



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



مقایسه سختی و خواص تریبولوژیکی نانوکامپوزیت‌های آلیاژ آلومینیوم 5083 با استفاده از پودر دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی با فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی

مصطفی گلی¹، احمد افسری^{2*}، سید احمد به‌گزین³، سید محمدرضا ناظم‌السادات⁴

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز

2- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز

3- استادیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای، دانشکده فنی و مهندسی باهنر شیراز، شیراز

4- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز

* شیراز، صندوق پستی 71365-364، Ah.Afsari1338@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

از فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی برای تولید ماده کامپوزیتی با زمینه فلزی بر روی آلیاژ پایه آلومینیومی 5083 به‌منظور بهبود خواص سختی و تریبولوژیکی استفاده شد. از پودر تقویت‌کننده دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی استفاده گردید و تعداد پاس‌ها برای انجام فرآیند تغییر داده شد. ریزساختار مواد کامپوزیتی تولیدشده با میکروسکوپ الکترونی روبشی و لایه‌های سطحی کامپوزیت توسط میکرو سختی مورد بررسی قرار گرفتند. این روش در 4 پاس، باعث حداکثر 32.3 درصد افزایش سختی در نانوکامپوزیت سطحی حاصل از پودر نانولوله کربنی و 21.6 درصد افزایش سختی در نانوکامپوزیت سطحی حاصل از پودر دی‌بوراید تیتانیوم نسبت به فلز پایه گردید. نمونه‌های تولیدشده با چهار پاس حاوی پودر نانولوله کربنی، دارای سختی 8 درصد بیشتر از سختی نمونه‌هایی با پاس مشابه با پودر دی‌بوراید تیتانیوم است. بیشترین مقاومت سایشی در 4 پاس حاصل گردید به‌طوری‌که مقاومت سایشی حاصل‌شده در حالت استفاده از نانولوله کربنی حدود 45 درصد بیش از حالت استفاده از پودر TiB₂ بوده و عمر کاری قطعه در شرایط سایشی را می‌توان با این عملیات تا 3.5 برابر افزایش داد.

دریافت: 1401/11/19

پذیرش: 1402/03/26

کلیدواژگان

فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی،

آلیاژ آلومینیوم 5083،

نانوکامپوزیت سطحی،

تریبولوژی، مقاومت سایشی، سختی

Comparison of hardness and tribological properties of AA5083 aluminum alloy nanocomposites using TiB₂ powder and carbon nanotube with friction-stir process

Mostafa Gooli¹, Ahmad Afsari^{1*}, Sayed Ahmad Behgozin², Sayed Mohammad Reza Nazemassadat¹

1- Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Engineering College of Bahonar, Shiraz, Technical and vocational university, Iran

* P.O.B. 71365-364 shiraz, Iran, Ah.Afsari1338@iau.ac.ir

Keywords

Friction stir processing, AA5083 Aluminum Alloy, Surface Nanocomposite, Tribology, Wear resistance, Hardness

Abstract

Friction stir process (FSP) was used to improve hardness and tribological properties of Al-5083 aluminum alloy through formation of metal matrix composite (MMC) material. The process involved the use of titanium diboride powder (TiB₂) and carbon nanotubes reinforcing materials. The number of passes during the process was varied. Observations of the microstructure of the composite materials were made using scanning electron microscopy (SEM), while the composited surface layers were examined using microhardness testing. After conducting four passes using FSP, the surface nanocomposite obtained from carbon nanotubes and TiB₂ yielded a maximum increase in hardness of 32.3%, and 21.6% compared to the base alloy respectively. Moreover, the samples produced with four passes, containing carbon nanotubes, showed a hardness 8% greater than the samples produced with the same number of passes, but with TiB₂. Additionally, the highest wear resistance was also obtained using four passes. The wear resistance exhibited by the carbon nanotube-reinforced composite was approximately 45% greater than the TiB₂ powder-reinforced composite. Hence, the use of FSP can potentially increase the working life of the part in wear conditions by up to 3.5 time.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Gooli, M., Afsari, A., Behgozin, S. A., Nazemassadat, S. M. R., "Comparison of hardness and tribological properties of AA5083 aluminum alloy nanocomposites using TiB₂ powder and carbon nanotube with friction-stir process, Vol. 10, No. 1, pp. 2138-2146, 2023.

https://doi.org 10.22068/JSTC.2023.1988946.1824

1- مقدمه

قطعه‌کار می‌چرخد، زمانی که پین بر روی ماده می‌نشیند پیشانی و سطوح جانبی آن با سطح ماده تماس پیدا کرده و بر اثر چرخش و گذشت زمان، ناحیه انتخاب‌شده در تماس به دلیل اصطکاک شدید موجود بین ابزار و قطعه گرم می‌شود. در این روش امکان کنترل عمق اغتشاش، سرعت پیشروی و سرعت چرخشی ابزار وجود دارد. به دلیل عدم ایجاد ذوب در این فرآیند، این روش را می‌توان جزو روش‌های حالت جامد تولید کامپوزیت فلزی تقسیم‌بندی نمود [1، 2 و 3].

با استفاده از فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی و ساخت نانو کامپوزیت سطحی به‌منظور بهبود خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری فولاد کم‌کربن با افزودن نانوذرات TiB₂ به آلیاژ ماتریس فولاد کم‌کربن، انجام‌شده و میکرو سختی تا 200 ویکرز بالاتر از فلز پایه ایجاد شد. همچنین نشان داده شد که با افزایش تنش کاری نمونه به حدود 28 درصد، نانو کامپوزیت سطح مقاومت کششی بهتری از خود نشان می‌دهد [4 و 5]. همچنین با اعمال فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی در فولاد کم‌کربن، دانه‌بندی ساختار تحت مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی می‌تواند تا ابعاد 0.5 میکرومتر ریز شود و استحکام کششی نمونه‌های فرآوری شده در شرایط بهینه فرآیند تا 50 مگاپاسکال افزایش یابد به همین ترتیب سختی نمونه‌های فرآوری شده تا حدود 2.5 برابر فلز پایه می‌تواند افزایش داشته و با بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌ها در نتیجه فرآوری اصطکاک‌آغتشاشی، متعاقباً رفتار تریبولوژیکی بهبود پیدا کرده و نرخ سایش نمونه‌ها هم حدود 28 درصد کاهش می‌یابد اما اعمال فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی تغییری در خواص خوردگی فولاد کم‌کربن ایجاد نمی‌کند [6].

در تحقیقی به‌منظور بهبود خواص سطحی و تریبولوژیکی آلیاژ آلومینیوم 6061، لایه‌های نانو کامپوزیت سطحی حاوی نانوذرات TiB₂، Al₂O₃-TiB₂، ZrO₂ و CNT توسط فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی بر روی آلیاژ آلومینیوم ایجاد گردیده است. افزایش تعداد پاس‌ها سبب افزایش سختی نانو ماده مرکب سطحی شده و بیشترین سختی و کمترین ضریب سایش هم در حالت استفاده از Al₂O₃+TiB₂ حاصل شده است [7]. در تحقیقی دیگر، پراکندگی توده‌ای تقویت‌کننده نانولوله کربن در کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم 6061، مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها در معرض تعداد پاس‌های گوناگون فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی از یک تا چهار پاس بوده است. مشاهدات ریزساختاری با به‌کارگیری میکروسکوپ الکترونی روبشی حکایت از سطح بهسازی شده و پراکندگی مناسب ذرات نانویی در 4 پاس در زمینه دارد [8].

توزیع و پایداری نانولوله‌های کربنی چند دیواره 5 در فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی چند پاسه کامپوزیت‌های آلیاژ آلومینیوم 5059 در تحقیقی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده که تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی بر روی این آلیاژ به‌وسیله نانولوله‌های کربنی چند دیواره با توزیع یکنواخت و درصد حجمی بالا با ساختار نانویی تقویت‌کننده به‌وسیله فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی چند پاسه با ابزارها و شرایط فرآیندی مختلف امکان‌پذیر است [9]. رابطه بین خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم و پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاک‌آغتشاشی روی شش دسته متفاوت آلیاژهای آلومینیوم (7075-1100-2219-2024-6061-7039) با استفاده از سطوح متفاوتی از پارامترهای فرآیند اجرا شده است. شرایط بهینه برای به دست آوردن حداکثر مقاومت برای هر آلیاژ با استفاده از روش ریاضی و آماری پاسخ سطح 6 مورد شناسایی قرار گرفته و روابط تجربی بین خواص مکانیکی فلز پایه آلیاژهای

بیشتر قطعاتی که در صنعت بکار گرفته می‌شوند از فلزات و آلیاژها ساخته شده‌اند و خواص سطحی آن‌ها، نظیر مقاومت به سایش، سختی و غیره در بسیاری از کاربردهای صنعتی تعیین‌کننده عمر قطعه می‌باشد. لیکن متأسفانه این قطعات به‌طور کلی دارای خواص مکانیکی و تریبولوژیکی ضعیفی هستند. اما عامل بالقوه بالایی برای تولید قطعات بر پایه فلز با خواص مکانیکی و تریبولوژیکی بهبود یافته وجود دارد. خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب، نسبت استحکام به وزن بالا، چگالی کم، مقاومت در برابر خوردگی، بازیافت و دیگر خواص مطلوب باعث شده که آلومینیوم و آلیاژهای آن به‌عنوان مناسب‌ترین و مفیدترین انتخاب در بسیاری از کاربردها باشد. از طرفی فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی برای ایجاد تغییرات میکرو ساختاری در مواد به کار می‌رود و مدت‌ها است که گرمادهی اصطکاک‌آغتشاشی به‌عنوان روش اتصال، فرآوری و عملیات بر روی مواد استفاده می‌گردد و از مهم‌ترین مزیت‌های این روش، می‌توان به بازدهی انرژی بالا و سازگاری خوب با محیط‌زیست اشاره کرد. این فرآیند از آغاز برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم کاربرد داشته و در صنایع هوافضا، راه‌آهن، خودروسازی و صنایع دریایی بکار گرفته می‌شود. با توجه به حرکت چرخشی و روبه‌جلوی ابزار، مناطق مختلف فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی را می‌توان به دو ناحیه پیشروی¹ و پس‌رو² تقسیم‌بندی کرد که در شکل 1 مشاهده می‌شود [1].

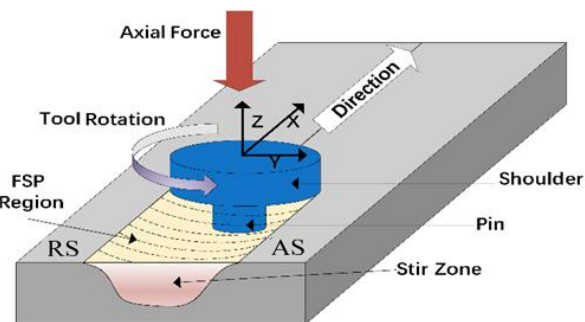


Fig 1 Schematic of the direction of linear and rotary movement of the tool and the naming of different process areas [1].

شکل 1 شماتیک جهت حرکت خطی و چرخشی ابزار و نام‌گذاری نواحی مختلف فرآیند [1].

در فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی خواص فلز پایه نظیر استحکام تسلیم، سختی و شکل‌پذیری، توسط جریان پلاستیک شدید³ ماده تحت چرخش ابزار غیرمصرفی، کنترل می‌شود. پارامترهای فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی نظیر سرعت دورانی، سرعت پیشروی و نیروی محوری ابزار، نقش عمده‌ای در کیفیت فرآیند ایفا می‌کنند. فرآیند اصطکاک‌آغتشاشی روشی است که بر پایه روش جوشکاری اصطکاک‌آغتشاشی برای بهسازی ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی فلزات به‌خصوص کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیوم ابداع شد، لیکن با این تفاوت که در این فرآیند، عمل جوشکاری انجام نمی‌گیرد. ابزار غیر مصرفی به درون قطعه نفوذ کرده و دو ماده، شامل ماده پایه و ماده تقویت‌کننده را باهم مخلوط می‌نماید و با تولید کامپوزیت زمینه فلزی⁴، خواص بهینه‌ای نسبت به فلز مادر ایجاد می‌گردد. در این روش از یک ابزار استوانه‌ای شکل دربردارنده شانه و پین استفاده شده است به‌گونه‌ای که پین بر روی محل از پیش تعیین‌شده‌ای از سطح

¹ AS, Ascending Side

² -RS, Retreating Side

³ SPD, Severe Plastic Deformation

⁴ MMC, Metal Matrix Composite

⁵ Multi Wall Carbon Nano Tubes, (MWCNT)

⁶ Response Surface Methodology, (RSM)

به‌طور یکنواخت در ناحیه فلز جوش توزیع می‌شوند. همچنین ریز سختی‌ها در شرایط بهینه به دلیل حضور ذرات سخت‌کننده افزایش می‌یابد [16]. بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا ماده مرکب سطحی بر پایه آلیاژ آلومینیوم 5083 با استفاده از روش اصطکاکی اغتشاشی تولید شود و به بررسی و مقایسه خواص نمونه‌های تولیدشده پرداخته شود. در این راستا از نانوذرات دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی، به‌عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده گردید. بررسی ریزساختاری، ارزیابی سختی و خواص تریبولوژیکی نمونه‌های تولیدشده به‌منظور بررسی موفقیت‌آمیز فرآیند در تولید مواد مرکب سطحی نیز به عمل می‌آید. هرچند افزودن ذرات سرامیکی دی‌بوراید تیتانیوم (TiB_2) به زمینه آلومینیومی تغییر چندانی در چگالی ماده به وجود نمی‌آورد، لیکن باعث افزایش قابل‌توجهی در استحکام ویژه کامپوزیت می‌شود. این بهبود به نسبت استحکام به وزن در کامپوزیت‌ها، نقش کلیدی در بهینه‌سازی و صرفه-جویی ماده برای استفاده در کاربردهای سازه‌ای دارد.

2- مراحل آزمایشگاهی

در این پژوهش، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلیاژ آلومینیوم 5083 انجام گرفت و ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در فرآیند از طریق آنالیز کوانتومتری مشخص شد. ماده اولیه به شکل ورق به ضخامت 6 میلی‌متر به شکل مستطیل به ابعاد 150×70 میلی‌متر به‌وسیله دستگاه وایرکات برش داده شد. این عمل به‌منظور جلوگیری از تاب برداشتن قطعه‌کار انجام شد تا در نهایت اختلاف سطح نمونه‌ها در حدود 0.05 میلی‌متر باقی بماند. در نمونه‌هایی از ورق که باید حاوی دو نوع پودر باشند، شیارهایی با طول 130، عرض 1 و عمق 3 میلی‌متر مطابق شکل 2، ایجاد گردید. قبل از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی سطح نمونه‌ها جهت زدودن آلودگی‌ها و چربی‌های ناشی از فرآیند برشکاری و فرزکاری به‌وسیله الکل تمیز گردید.

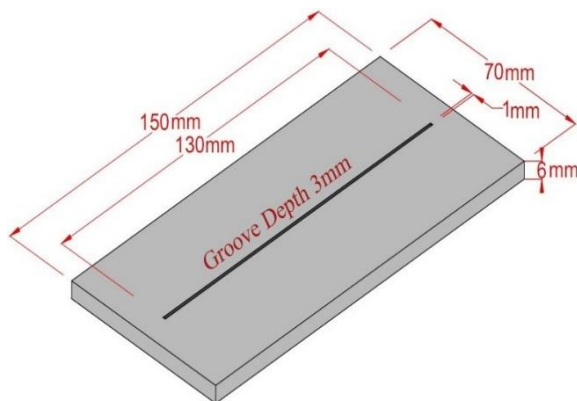


Fig 2 Schematic of the sample of the cut piece with a middle groove
شکل 2 شماتیک نمونه قطعه برش خورده و دارای شیار وسط

جهت کامپوزیت سازی در این پژوهش، از پودرهای دی‌بوراید تیتانیوم (TiB_2) و نانولوله کربنی به‌عنوان ماده تقویت‌کننده استفاده گردید. دی‌بوراید-تیتانیوم یکی از پایدارترین ترکیبات دو عنصر تیتانیوم و بور است. سختی زیاد، پایداری شیمیایی و نقطه ذوب بالا، مقاومت در برابر اسید، مقاومت به سایش و شوک‌های حرارتی از خواص مهم این ماده می‌باشد. در یک نانولوله کربنی، اتم‌های کربن در ساختاری استوانه‌ای آرایش می‌گیرند. یعنی یک لوله توخالی که جنس دیواره آن از اتم‌های کربن است. آرایش اتم‌های کربن در دیواره این ساختار استوانه‌ای، دقیقاً مشابه آرایش کربن در

آلومینیوم و پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بهینه‌شده برقرار گردید. این روابط می‌تواند به‌طور مؤثر در پیشگویی پارامترهای بهینه‌شده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با توجه به خواص فلز پایه شناخته‌شده (مقاومت تسلیم، ازدیاد طول و سختی) بکار رود [10].

در تحقیق پودرهای Al و TiO_2 برای تولید کامپوزیت آلومینیوم از طریق فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با چند پاس بر اساس آنالیزهای ترمودینامیکی بکار گرفته شد و بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند واکنش بین Al و TiO_2 را ایجاد نماید و آزمون کشش نشان داد که کامپوزیت‌های در جا تولیدشده رفتار کارسختی و ترکیبی خوب از شکل‌پذیری و استحکام را از خود نشان می‌دهد [11]. در پژوهشی انتخاب پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برای کامپوزیت‌های سطحی آلیاژ آلومینیوم بازیافتی 6063 تقویت‌شده با دی‌اکسید تیتانیوم برای عملکرد تریبولوژیکی بهتر انجام‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های سطحی تولیدشده با سرعت چرخش بالای 2442 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 50 میلی‌متر بر دقیقه، 45 درصد ریزسختی سطح را بهبود بخشیده و ضریب اصطکاک و نرخ سایش را به ترتیب 39 و 73 درصد نسبت به مواد پایه کاهش داده است [12].

تأثیر سرعت چرخشی و تقویت‌کننده‌ها روی سایش و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ترکیبی آلومینیوم از طریق فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بررسی شده است تا اثر ذرات تقویت‌کننده نظیر کاربید سیلیسیم، گرافیت و سرعت چرخش بر روی سایش و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ترکیبی سطحی آلیاژ آلومینیوم مشخص شود. نتایج نشان داد که ذرات تقویت‌کننده نظیر کاربید سیلیسیم و گرافیت به‌طور یکنواخت در ناحیه اغتشاشی توزیع می‌شوند و ریز سختی در شرایط بهینه به دلیل حضور و اثر سختی ذرات کاربید سیلیکون افزایش می‌یابد [13]. لایه‌های کامپوزیتی سطحی حاوی ذرات $Al_2O_3-TiB_2$, ZrO_2 , TiB_2 و CNT در اندازه‌های نانو با پردازش اغتشاشی اصطکاکی بر روی بسترهای آلیاژ آلومینیوم ساخته شدند و نتایج حاکی از آن است که افزایش تعداد پاس‌ها تا چهار مورد منجر به اصلاح مناسب ریزساختار و متعاقب آن بهبود در خواص مکانیکی و سایش می‌شود [14].

در پژوهشی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در ساخت کامپوزیت‌های سطحی هیبریدی آلومینیوم با تعبیه ذرات تقویت‌کننده یعنی اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) یا آلومینا، نیتريد بور (BN) و گرافیت (Gr) با کاربید بور (B_4C) با حجم برابر بررسی شده است. از نظر استحکام و سختی، کامپوزیت‌های سطحی با ترکیبات Al_2O_3 و B_4C خواص مکانیکی بهتری نسبت به سایر ترکیبات داشتند. نتایج مطالعات سایش نشان می‌دهد که سطوح پردازش‌شده اصطکاکی اغتشاشی مقاومت بهتری در برابر سایش در مقایسه با مواد پایه در شرایط لغزش خشک از خود نشان می‌دهند. غلبه سایش ساییده در تمام موارد کامپوزیت‌های سطحی علیرغم وجود ترک‌های ریز و لایه‌لایه شدن روی سطح فرسوده مشاهده شد. تجزیه و تحلیل نتایج تفرق اشعه ایکس 1 نشان می‌دهد که هیچ فاز ثانویه یا بین فلزی در منطقه پردازش‌شده تشکیل نشده است [15]. تأثیر تقویت‌کننده‌های کاربید سیلیسیم و آلومینا و سرعت چرخشی روی سایش و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA6061-T6 بر اساس کامپوزیت‌های ترکیبی سطحی تولیدشده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که همه ذرات تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های ترکیب سطحی

¹ X Ray Diffraction, (XRD)

قطعه، تنظیم زمان دقیق برای گرم و خمیری شدن اولیه بدون پیشروی ابزار و تنظیم دقیق زمان بین دو پاس جهت سرد شدن دستگاه از مواردی است که باید قبل از شروع عملیات به دقت تعیین شود. در این رابطه مشخصات پارامترهای اعمالی در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی ابزار 1600 دور در دقیقه، سرعت پیشروی ابزار 31 میلی‌متر بر دقیقه، عملیات با تعداد 1، 2 و 4 پاس، قطر پین 3 میلی‌متر، قطر شانه ابزار 5 میلی‌متر و طول پین 18 میلی‌متر، انتخاب گردید درحالی‌که هندسه پین به صورت استوانه‌ای شکل و زاویه انحراف ابزار 2.75 درجه طراحی گردید. عمق نفوذ شانه ابزار در قطعه کار هم 0.2 میلی‌متر است.

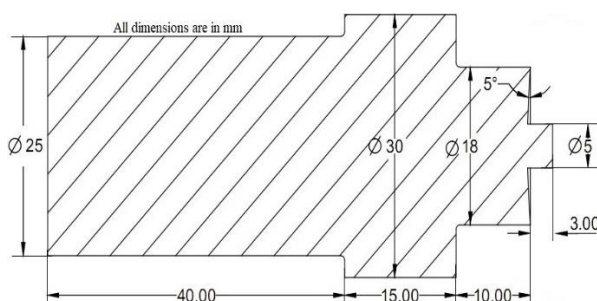
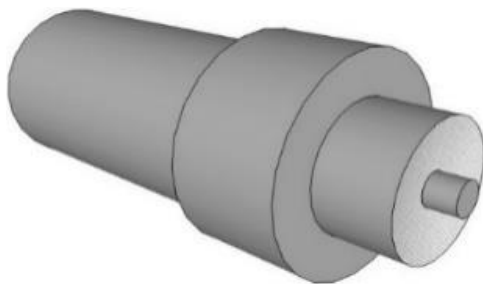
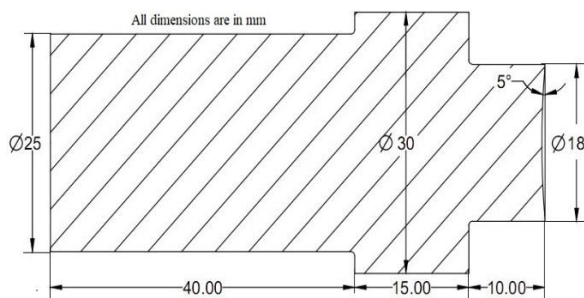
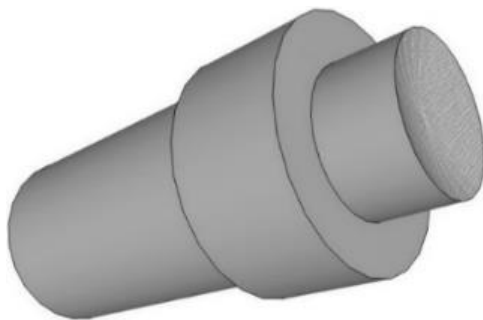


Fig 3 CAD model and map of tool number 1 (top) and tool number 2 (bottom)

شکل 3 نقشه و مدل CAD ابزار شماره 1 (بالا) و ابزار شماره 2 (پایین)

صفحات گرافین است. با رول شدن صفحات گرافین، نانولوله‌های کربنی تشکیل می‌دهند. نانولوله‌های کربنی به دودسته کلی نانولوله‌های کربنی تک دیواره 1 و نانولوله‌های کربنی چند دیواره تقسیم‌بندی می‌شوند. چنانچه نانولوله کربنی فقط شامل یک لوله از گرافیت باشد، تک دیواره و اگر شامل تعدادی از لوله‌ها با مرکز مشترک باشد چند دیواره نامیده می‌شود. اندازه کوچک، چگالی کم، سختی و استحکام بالا و همچنین خواص الکتریکی عالی از مهم‌ترین خواص آن‌ها محسوب می‌گردد. نانولوله‌های کربنی یکی از مستحکم‌ترین مواد به شمار می‌روند و دارای نسبت استحکام به وزن بالا هستند و این موضوع، دلیل کاربرد آن‌ها را به‌عنوان ماده پرکننده در تولید نانو کامپوزیت‌ها به‌خوبی روشن می‌سازد. پودر دی‌بوراید تیتانیوم مدول کشسانی در حدود 510-575 گیگاپاسکال و سختی 1800 نوپ و نانولوله کربنی مدول کشسانی 300-1000 گیگاپاسکال و استحکام 10-500 گیگاپاسکال داشته و به‌عنوان پر استحکام‌ترین ماده طبیعت شناخته می‌شود [18-19].

ابزارهای بکار رفته در این تحقیق از دو میلگرد خام به قطر 32 میلی‌متر از جنس فولاد گرم کار 1.2344 (فولاد H13 در استاندارد AISI و X40CrMoV5-1 در استاندارد DIN) تهیه شدند. سیلیسیم و کرم در این فولادها برای افزایش مقاومت به اکسیداسیون در دماهای بالا و عناصر وانادیوم و مولیبدن برای حفظ استحکام در شرایط کار گرم را در خوددارند.

قطعات خام اولیه در ابتدا مطابق نقشه‌های شکل 3 تحت عملیات تراشکاری قرار گرفتند. به‌منظور جلوگیری از بالا رفتن ابزار در ابزارگیر در اثر فشار اعمالی، یک پله به قطر 30 میلی‌متر روی هر دو ابزار ایجاد گردید. دنباله ابزار که دارای قطر 25 میلی‌متر می‌باشد دقیقاً متناسب با قطر ابزارگیر ماشین فرز طراحی گردیده و سپس عملیات سنگ‌زنی بر روی هر دو ابزار انجام گردید. درنهایت برای دستیابی به سختی مناسب برای عملیات، ابزارهای ساخته‌شده تا حدود سختی 52 ± 2 راکول سی، تحت عملیات حرارتی، آبدهی و بازگشت قرار داده شدند. ابزار شماره 1 دارای شانه (پیشانی) صاف و بدون زائده می‌باشد وظیفه آن بستن رویه شیار وسط نمونه‌ها، بعد از اعمال پودر در داخل شیار می‌باشد و به دلیل آنکه این ابزار باید جریان مواد را با اعمال زاویه کنگی به پشت سرخود هدایت نماید دارای سطحی مقعر با زاویه جزئی به سمت مرکز ابزار می‌باشد. اما ابزار شماره 2 در قسمت پیشانی، دارای یک پین استوانه‌ای شکل به قطر 5 میلی‌متر و ارتفاع 3 میلی‌متر است. ارتفاع 3 میلی‌متر به‌منظور نفوذ پودر به عمق فلز زمینه در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بوده و متناسب با ضخامت 6 میلی‌متری ورق آلومینیوم 5083 انتخاب شده است.

در این تحقیق تأثیر تعداد 1، 2 و 4 پاس (گذر یا عبور)، بر روی خواص مکانیکی و تریبولوژیکی در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلیاژ آلومینیوم 5083 با استفاده از دو نوع ماده تقویت‌کننده TiB₂ و CNT مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور عملیات بر روی هفت نمونه انجام پذیرفت، در ابتدا نمونه شماره 1 که بدون شیار است و بدون این که پودری اعمال شود با استفاده از ماشین فرز محور عمودی با یک پاس تحت فرآیند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفت و سپس انجام عملیات بر روی شش نمونه دیگر با تعداد 1، 2 و 4 پاس برای پودر تقویت‌کننده TiB₂ و با همین تعداد پاس برای تقویت‌کننده CNT انجام پذیرفت.

بستن قطعه بر روی ماشین، قرار دادن پودرها در شیار قطعه، ساعت کردن افقی قطعه، تنظیم ابزار در وسط قطعه در محل شیار، تنظیم زاویه کنگی محور ماشین فرز، تنظیم سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار، مماس کردن ابزار به

¹ Single Wall Carbon Nano Tubes, (SWCNT)

پیشروی و دورانی ابزار، میزان حرارت ورودی به ماده کنترل شده و از سیلان ماده پایه به صورت پلیسه جلوگیری می‌گردد. از سوی دیگر با کاهش میزان نفوذ ابزار در قطعه، اصطکاک که لازمه ایجاد حرارت است به شدت کاهش می‌یابد و در اثر کم شدن حرارت تولیدی، ماده پایه سیلان لازم را پیدا نمی‌کند و احتمال به وجود آمدن عیوب ساختاری از جمله حفرات، افزایش می‌یابد. در این موارد نیروهای وارده به ابزار و دستگاه فرز مورد استفاده در انجام عملیات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به شدت افزایش می‌یابد.

پس از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، عملیات برش، مانت، سنباده‌زنی، پولیش و نمدمالی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. سپس از نمونه‌های آماده شده توسط میکروسکپ نوری تصویربرداری شده تا نحوه توزیع پودر در ناحیه اغتشاشی مورد بررسی قرار گیرد. در این آزمایش، پس از انجام حکاکی (اچ کردن) علاوه بر توزیع ذرات، ریزساختار و دانه‌بندی آلایژ نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش سختی به روش ویکرز و با استفاده از دستگاه خودکار سختی‌سنج میکرو بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. اعمال نیرو به مقدار 100 گرم و با حرکت میز صلیبی صورت گرفت. در این آزمایش جانمایی محل سختی و اندازه‌گیری قطر اثر، با دقت یک میکرون قابل دستیابی است. دستگاه سایش‌سنج، از نوع پین روی دیسک ساینده با سختی 50 راکول سی و با اعمال تنش 100 کیلوپاسکال بر روی پین با مقطع 2.25 سانتیمتر مربع بوده و سرعت خطی 10 متر بر دقیقه برای مسافت 3000 متر برای هر نمونه به طور جداگانه با استاندارد ASTM G99 انجام شد تا رفتار سایشی سطوح نانو کامپوزیت‌های ایجاد شده مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند.

3- بحث و تحلیل نتایج

بازرسی چشمی پس از پایان فرآیند اصطکاکی اغتشاشی جهت بررسی ظاهری نمونه‌ها صورت گرفت و در نمونه‌های بدون پودر با یک پاس و همچنین در نمونه‌های با پودر، با یک و دو چهار پاس، تفاوت ظاهری یا عیوب در ناحیه اغتشاشی مشاهده نگردید.

3-1- بررسی‌های متالوگرافی

ریزساختار ورق آلایژ آلومینیوم 5083 قبل از اعمال عملیات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل اعمال روش تولید با فرآیند نوردکاری دارای دانه‌بندی خشن و کشیده شده می‌باشد. بررسی ریزساختاری نشان می‌دهد که شیار ایجاد شده بر روی سطح ورق بعد از اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به طور کامل از بین رفته است. همچنین ذرات دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی در ناحیه اغتشاش یافته به گونه‌ای پراکنده شده‌اند که در اثر اختلاط، اثری از تجمع یا توده‌ای شدن پودرها، بخصوص در نمونه‌هایی با چهار پاس باقی نمانده است.

در شکل 5-الف که قطعه تولیدی با چهار پاس همراه با پودر دی‌بوراید-تیتانیوم می‌باشد نقاط سیاه‌رنگ نشانگر عیب حفره تونلی و نقاط سفیدرنگ نشان‌دهنده ذرات دی‌بوراید تیتانیوم می‌باشد. شکل 5-ب که قطعه تولیدی با چهار پاس همراه با پودر نانولوله را نشان می‌دهد. نقاط سیاه‌رنگ در اینجا نیز نشان‌دهنده عیب حفره تونلی بوده و تارهای مویی شکل که به صورت تقریباً محو در زمینه توزیع شده‌اند، رشته‌های نانولوله کربنی می‌باشند.

با مشاهده تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روشی در هر دو نوع پودر، اندازه و نحوه توزیع نانوذرات در داخل فلز پایه قابل مشاهده است. در مورد آلایژهای آلومینیوم به طور معمول دو ناحیه ریزساختاری عمده پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل ناحیه هم‌خورده یا اغتشاشی و ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکال، قابل تمایز است. در صورت وجود ذرات تقویت‌کننده، کامپوزیت سطحی در ناحیه اغتشاشی تشکیل گشته و سبب ریزدانه شدن و بهبود جهت‌گیری دانه‌ها از نظر هم محور بودن نیز می‌شود. در میکروسکوپ الکترونی

به دلیل آنکه ماده واقع شده در زیر ابزار در اثر اصطکاک و گرما حالت خمیری پیدا می‌نماید جهت هدایت این ماده خمیری به سمت پشت ابزار و انجام عمل فورجینگ، لازم است به کنگی ماشین فرز زاویه‌ای در حدود 2.75 درجه در جهت خلاف پیشروی ابزار داده شود. ابزار شماره 1 فاقد پین بر روی پیشانی خود بوده وظیفه بستن رویه شیار به عمق 3 میلی‌متر و محبوس نمودن پودرها را به عهده دارد. بعد از عمل بسته شدن شیار به وسیله ابزار شماره 1، ابزار شماره 2 در ابزار گیر نصب می‌شود و آماده مراحل بعدی می‌گردد. زمان لازم برای گرم و خمیری شدن بدون پیشروی ابزار در حدود 5 دقیقه است که تغییر رنگ ابزار و بالا رفتن دما در آن به خوبی محسوس است. در نمونه‌های دو چهار پاس به همراه دو نوع ماده تقویتی در پایان پاس اول، ابزار به نقطه مبدأ انتقال یافته و با تکرار عملیات در حالی که قطعه همچنان گرم است، پاس دوم و پاس‌های بعدی اجرا می‌گردد. در انتهای حرکت ابزار در طول نمونه، ابزار با توقف پیشروی، به طور عمودی از محل عملیات خارج می‌شود. شکل 4 فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به وسیله ابزار شماره 1 و 2 را نشان می‌دهد.



Fig 4 (a) Covering the groove using tool number one and (b) performing the process with multiple passes using tool number two.

شکل 4 (الف) پوشاندن شیار به وسیله ابزار شماره یک و (ب) اجرای فرآیند با پاس - های متعدد به وسیله ابزار شماره دو.

بدیهی است که در حین فرآیند، بازدید و کنترل چشمی، جهت کنترل عدم بروز نقص در ظاهر نمونه به طور کامل وجود داشته و پس از اطمینان از صحت عمل در پاس اول، نسبت به اجرای پاس دوم اقدام گردیده است. در انتهای حرکت ابزار و در پایان اختلاط فلز پایه و ماده تقویت‌کننده، یک حفره که همان اثر نوک پین ابزار است در محل خروج ابزار تشکیل می‌گردد. این حفره مهم‌ترین عیب ظاهری فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بوده و با افزودن طول قطعات و با انجام عمل برش، این عیب را می‌توان حذف نمود. در حین اجرای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی نمونه‌ها، مقداری از ماده پایه عمدتاً در طرف پیشرو حرکت ابزار به دلیل افزایش میزان عمق نفوذ و همچنین حرارت ورودی ابزار، منجر به تشکیل پلیسه‌های نازک می‌گردد. با کنترل عمق نفوذ، سرعت

ذرات تقویت‌کننده TiB₂ و MWCNT با افزایش تعداد پاس‌های ابزار بهبودیافته و در چهار پاس، توزیع تجمعی ذرات به‌وضوح کاهش داشته است. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد افزودن ذرات TiB₂ و MWCNT باعث متوقف شدن مهاجرت مرزدانه‌ها و جلوگیری از رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته شده و همچنین با ایجاد مراکز جوانه‌زنی در ساختار و باعث شکستن دانه‌های بزرگ‌تر به اندازه‌های کوچک‌تر از طریق ایجاد دانه‌های جدید دینامیکی پیوسته گردیده است [7].

2-3- بررسی سختی

سختی در نقاطی بافاصله قرینه از مرکز خط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بررسی گردیده و پروفیل سختی، برای نمونه‌های حاوی پودرهای TiB₂ و MWCNT رسم شد. در نمونه‌های حاوی پودر دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله، در شش نقطه اول سنجش سختی در دو طرف خط مرکز بافاصله 200 میکرومتر از سطح صورت پذیرفته است و پس از آن فواصل سنجش به 400 میکرومتر افزایش یافته است. نمودارهای شکل‌های 6 و 7 میزان سختی در مقطع عرضی نمونه فرآوری شده حاوی دو نوع ماده تقویت‌کننده با چهار پاس را نشان می‌دهد. درحالی‌که حوزه بررسی در این تحقیق تنها محدود به منطقه اغتشاشی می‌باشد تفسیر نمودارهای سختی می‌تواند ارزیابی درستی از چگونگی تغییرات خواص مکانیکی در نواحی مختلف از جمله منطقه اغتشاش یافته را ارائه نماید. به‌وسیله کنترل عمق نفوذ ابزار در ناحیه اغتشاشی می‌توان با اندازه‌گیری سختی در سطح، برآوردی از چگونگی توزیع ذرات تقویت‌کننده و اندازه دانه‌های حاصل در پایان فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، به دست آورد. با توجه به این‌که آلیاژ مورد استفاده Al5083-H12 از سری 5000 بوده و قابلیت عملیات حرارتی را ندارد پس از طریق رسوب سختی نمی‌توان سختی و استحکام آن را افزایش داد و تنها از طریق کاهش اندازه دانه‌ها، کارسرد و از طریق بهبود نحوه قرارگیری دانه‌ها با ایجاد دانه‌های هم‌محور دست‌یابی به این هدف امکان‌پذیر است.

به علت وجود عناصر آلیاژی ممکن است مکانیزم ترمیمی بخصوصی در این آلیاژ 5083 در طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی رخ دهد. آلومینیوم دارای انرژی نقص در چیده شدن صفحات اتمی بزرگی است که تبلور مجدد دینامیکی پیوسته و ایجاد ریزدانه‌ها بدون جوانه‌زایی و رشد را در این آلیاژ محتمل‌تر می‌سازد. اثر دیگر عناصر آلیاژی این است که مقدار و توزیع آن‌ها می‌تواند حرکت مرزدانه‌ها را محدود نموده و مانع رشد دانه‌ها گردد که این به اثر زرنر² مشهور است. زمانی که توزیع همگن عناصر آلیاژی و فازهای ثانویه صورت می‌گیرد بازبایی دینامیکی و تبلور مجدد دینامیکی غیر پیوسته نیز محدود می‌شود و این پدیده احتمال وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته را در ناحیه اغتشاشی با افزایش پاس، افزایش می‌دهد بنابراین دانه‌های هم‌محور در این آلیاژ با حرکت مرزهای فرعی و تبدیل هر دانه به چند دانه کوچک‌تر به دست می‌آید ولی وجود عناصر آلیاژی می‌تواند باعث کاهش انرژی نقص در چیده شدن صفحات اتمی آلومینیوم و فعال شدن ایجاد دانه‌های جدید از طریق غیر پیوسته و با روش جوانه‌زنی و رشد گردد. [17].

با توجه به شکل 6 و 7 که سختی را برحسب فاصله از مرکز منطقه اغتشاشی نشان می‌دهد و مقایسه سختی نمونه با یک پاس و بدون پودر با نمونه اولیه مشاهده می‌شود که سختی متوسط در اثر فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی فقط در حدود 1.5 ویکرز به سختی متوسط آلیاژ افزوده است در حالیکه با استفاده از پودر نانولوله و 1 پاس در این عملیات منجر به افزایش سختی حدود 3.5 درصد گردید. با اعمال ذرات تقویت‌کننده TiB₂ در 2 و 4 پاس عملیات،

رویشی و استفاده از آشکارساز الکترون برگشتی¹، اجزاء دارای میانگین عدد اتمی بالاتر، روشن‌تر دیده می‌شوند (نانوذرات) و نقاط دارای عدد اتمی پایین‌تر، تیره‌تر دیده می‌شوند. در تصاویر، پراکندگی ذرات TiB₂ به‌صورت رنگ روشن در زمینه آلیاژ پایه آلومینیوم 5083 به‌خوبی مشاهده می‌گردد.

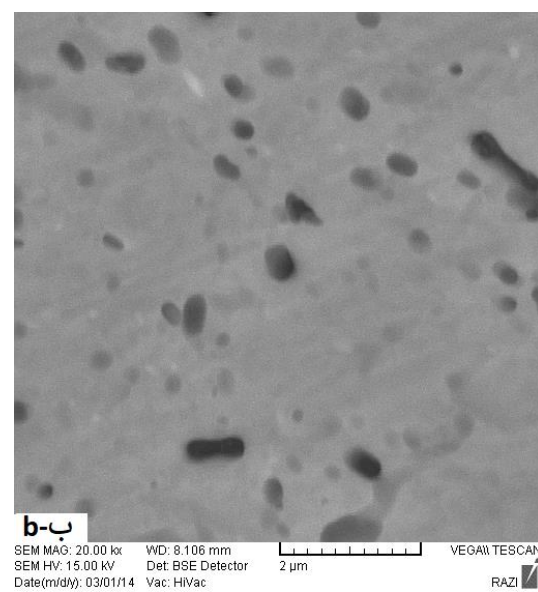
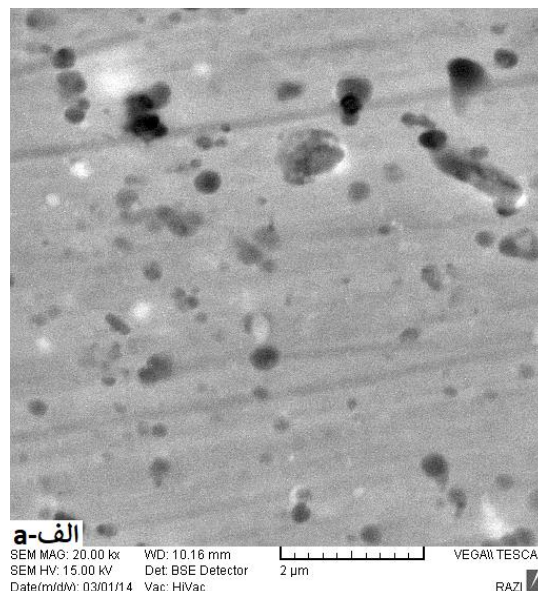


Fig 5 SEM image using backscattered electron of samples with four passes, (A) sample containing TiB₂ powder and (B) sample containing MWCNT powder.

شکل 5 تصویر SEM با استفاده از الکترون برگشتی از نمونه‌های با چهار پاس، (الف) نمونه حاوی پودر TiB₂ و (ب) نمونه حاوی پودر MWCNT.

نحوه توزیع ذرات در تصاویر گویای این مطلب است که پس از اعمال چهار پاس توسط ابزار، هر دو نوع ماده تقویت‌کننده با آلیاژ پایه دارای لایه‌مرزی مشخص بوده و از توزیع همگنی در زمینه فلزی برخوردار می‌باشند. نحوه توزیع

¹ Electron Back Scatter Diffraction, (EBSD)

² Zener effect

غیریکنواختی بین سمت راست و چپ وسط کم شده و با کاملاً از بین برود و در نهایت یک پروفیل سختی یکنواختی را در سه منطقه به وجود آورد. ترکیب عوامل مختلف در هر نقطه از منطقه اغتشاشی از جمله درجه حرارت، مقدار تغییر شکل مکانیکی، مقدار پودر در آن نقطه، میزان واکنش پودر با زمینه و نوع مکانیزم‌های تولید دانه‌های جدید اعم از پیوسته، غیر پیوسته یا هندسی می‌تواند بر میزان سختی نهایی مؤثر باشد. این آزمایش به خوبی اثر ذرات تقویت کننده و تعداد پاس و اثر میزان توزیع ذرات بر سختی و در نتیجه بر میزان ایجاد دانه‌های جدید و رشد دانه‌ها و اثر غیریکنواختی تغییر شکل در سمت پیشرو پس‌رو بر توزیع پودر را نشان می‌دهد.

افزودن نانوذرات، با جلوگیری از رشد دانه در ناحیه اغتشاش یافته، توزیع سختی نمونه‌های تولیدی را بهبود می‌بخشد. این پدیده بخصوص در نمونه‌های با چهار پاس با بالا رفتن عدد سختی نمونه‌ها مشخص است. یعنی افزوده شدن TiB_2 و MWCNT در ناحیه اغتشاش یافته، باعث می‌گردد که اثر افت سختی ناشی از کاهش نابعایی‌ها را از بین ببرد. پیش‌بینی می‌شود با کاهش حرارت تولیدی در واحد طول از طریق کاهش سرعت دورانی تا حدود 1200 دور بر دقیقه و افزایش سرعت خطی تا 50 میلی‌متر بر دقیقه و همچنین افزایش سرعت سرد شدن از طریق رعایت فواصل زمانی به‌منظور خنک شدن کامل نمونه‌ها و سریع خنک کردن نمونه‌ها و افزایش تعداد پاس بتوان به عددهای سختی بالاتری نیز دست پیدا نمود.

با مقایسه دو نمودار سختی نمونه‌های حاصل شده با پودر دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی با یکدیگر این استنباط وجود دارد که در شرایط یکسان، سختی در نمونه‌های انجام شده با پودر دی‌بوراید تیتانیوم در همه نقاط، کمتر از نمونه‌های حاوی نانولوله باشد. دلیل این اختلاف در سختی، توزیع بهتر ذرات پودر نانولوله کربنی در زمینه و همچنین سختی ذاتی بالاتر ذرات نانولوله کربنی می‌باشد. این تفاوت سختی در هر نقطه با افزایش تعداد پاس بیشتر می‌شود.

2-3- رفتار سایشی

هدف از ایجاد کامپوزیت سطحی با دو نوع پودر نانوی مورد استفاده، ارتقاء خواص تریبولوژیکی آلیاژ پایه و در نهایت مقایسه چگونگی تأثیر دو نوع ماده تقویت کننده مورد استفاده در فرآیند بر رفتار سایشی کامپوزیت تولید شده می‌باشد. مطابق آزمون انجام شده، از طریق محاسبه و رسم نمودار کاهش وزن نمونه اولیه نسبت به مسافت طی شده و مقایسه ضریب اصطکاک نسبت به زمان سایش می‌توان به بررسی خواص سایشی نمونه‌های تولید شده پرداخت. شکل 8 و 9 افزایش سایش در نمونه خام و نمونه فاقد ذرات تقویت کننده همراه با نمونه‌های حاوی پودر دی‌بوراید تیتانیوم با 2 و 4 پاس و شکل 10 و 11 نیز نمودارهای کاهش وزن و نرخ سایش را در حالت استفاده از پودر نانولوله کربنی در 1 و 2 و 4 پاس نشان می‌دهد. این تصاویر بیانگر تغییرات سطحی یا توپوگرافیکی سطوح در معرض سایش بوده و اثر بازدارنده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و پودر و تعداد پاس را بر نرخ سایش نشان می‌دهد. کاهش نرخ سایشی در قطعات می‌تواند در نتیجه اثر وجود ذرات نانولوله و ذرات دی‌بوراید تیتانیوم و ریز شدن دانه‌ها باشد.

نتیجه آزمایش سایش در دو نمونه خام و نمونه بدون پودر تقویت کننده با یک پاس بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشد. قطعه خام به دلیل ساختار درشت حاصل از روش تولید در مقایسه با قطعه تک پاس بدون پودر که تحت فرآیند اصطکاک اغتشاشی، ریزدانه‌تر شده است دارای ضریب اصطکاک بالاتری می‌باشد. به دلیل سختی لایه‌های کامپوزیتی حاصل شده، نمونه‌های با چهار پاس و پودر تقویت کننده دارای کمترین نرخ سایش است. در حالی که نمونه‌هایی با دو پاس، یک پاس و پودر تقویت کننده و نمونه بدون پودر تقویت کننده با یک

سختی متوسط 8.36 و 11.8 درصد نسبت به فلز پایه افزایش می‌یابد در حالیکه با استفاده از نانولوله کربنی این افزایش سختی در 2 و 4 پاس برابر 8.71 و 18.8 درصد نسبت به فلز پایه می‌باشد. با مقایسه بین دو نوع ماده تقویت کننده، مشاهده می‌شود که در 2 پاس تفاوت معنی‌داری بین سختی متوسط دیده نمی‌شود اما افزایش پاس به 4 باعث ایجاد تفاوت حدود 6.5 درصدی در سختی متوسط می‌گردد. به‌طور کلی رفتار سختی در منطقه اغتشاشی را می‌توان به سه منطقه میانی-سمت راست یا منطقه پس‌رو- منطقه سمت چپ یا پیشرو تقسیم کرد. در منطقه وسط با عرض 1 میلی‌متر (1000 میکرومتر)، شیار اولیه ایجاد شده برای وارد کردن پودر را نشان داده و یک پیک در وسط داشته و در لبه‌ها حداقل سختی وجود دارد و در دو طرف راست و چپ نیز با دور شدن از مرکز فرایند اغتشاشی سختی‌ها حالت افزایشی داشته و در انتهای منطقه اغتشاشی به حداکثر خود می‌رسند.

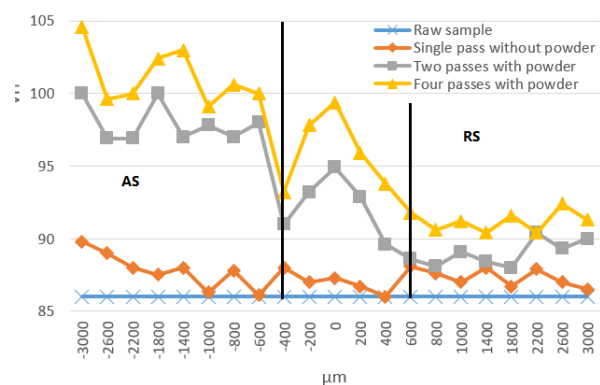


Fig 6 Vickers hardness diagram of samples containing TiB_2 powder
شکل 6 نمودار سختی ویکرز نمونه‌های حاوی پودر TiB_2

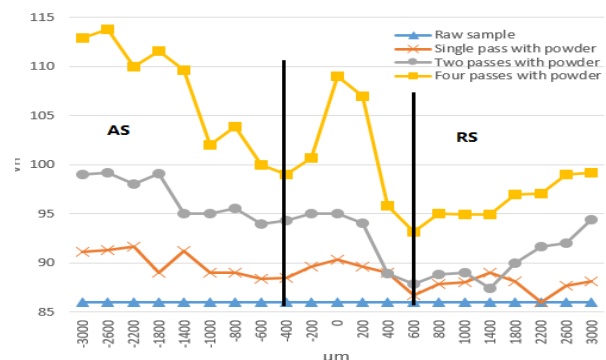


Fig 7 Vickers hardness diagram of samples containing MWCNT nano powder
شکل 7 نمودار سختی ویکرز نمونه‌های حاوی پودر نانویی MWCNT

با افزایش پاس در تمام مناطق، منحنی‌های سختی به سمت مقادیر بزرگ‌تر انتقال یافته و تفاوت سختی‌ها واضح‌تر می‌شود. افزایش پاس، باعث انتقال ذرات از منطقه وسطی بیشتر به منطقه پیشرو سپس پس‌رو گردیده و بر ایجاد دانه‌های ریز و سخت‌تر شدن ساختار اثر می‌گذارد. بنابراین به نظر می‌رسد تعداد 4 پاس و همچنین میزان نیروی عمودی اعمالی در فرآیند برای توزیع کامل مواد تقویت کننده و سیلان کامل مواد کافی نبوده و به همین دلیل رفتار سختی در دو طرف منطقه مرکزی یکسان نیست. حرکت ترجیحی مواد در سمت پیشرو باعث انتقال بیشتر پودر در سمت چپ و سختی بیشتر شده است. انتظار می‌رود که در صورت اعمال فشار عمودی بیشتر یا افزایش پاس این

پاس به ترتیب در مراحل بعدی قرار دارند، قطعه خام دارای بیشترین نرخ سایش می‌باشد. در نمودار شکل‌های 8 و 10 روند افزایشی کاهش وزن متناسب مستقیمی با ضریب اصطکاک و مقدار سختی نمونه‌ها دارد. تغییرات کاهش وزن در نمونه خام تا نمونه چهار پاس، حاصل ریزش دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی و همگن شدن توزیع ذرات سخت‌کننده نانویی در داخل زمینه می‌باشد. خواص ضد سایشی مربوط به ذرات نانولوله نیز تأثیر مستقیمی بر روی کاهش وزن نمونه در اثر سایش در قطعات دارای پاس‌ها یا گذر بالاتر دارد. می‌توان نتیجه گرفت که با اجرای پاس‌های بالاتر، مهم‌ترین مشکل استفاده از ماده تقویت-کننده نانویی که همان غلبه بر نیروهای تجمع و پیوستگی و اندروالسی آن‌ها است می‌تواند مرتفع شده و تجزیه و توزیع همگن ذرات زمخت و خشن و پراکنده کردن این ذرات در ماتریس شبکه ماده پایه، منجر به کم شدن کاهش وزن ناشی از سایش در نمونه‌های دارای پاس بالاتر در طی آزمون سایش گردد. با مقایسه دو نمودار سایش در نمونه‌هایی با پودر دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله کربنی با یکدیگر به این نتیجه می‌توان دست یافت که میانگین نرخ سایش در نمونه دارای پودر دی‌بوراید تیتانیوم در همه نقاط دارای عدد میانگین بالاتری نسبت به نمونه دارای نانولوله می‌باشد. دلیل این رفتار، توزیع بهتر ذرات پودر نانولوله در ساختار کامپوزیت زمینه و همچنین وابستگی مقاومت سایشی به مقدار سختی، ضریب اصطکاک و سختی ذاتی بسیار بالای ذرات نانولوله کربنی نسبت به ذرات دی‌بوراید تیتانیوم و احتمالاً واکنش متفاوت سطحی این ذرات با زمینه آلومینیومی می‌باشد. در هر دو حالت استفاده از پودر دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله با افزایش مسافت، نرخ سایش به مقدار نسبتاً ثابتی رسیده و فاصله نرخ سایش نمونه‌ها هم کمتر می‌شود. در نمونه‌های با 4 پاس تغییرات خاصی در نرخ سایش با افزایش مسافت وجود ندارد، زیرا شرایط سطح تغییر نمی‌کند و ذرات تقویت‌کننده به‌طور موثری در عمق سطح نفوذ کرده و به‌صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. در نمونه بدون پودر و یک پاس و نمونه خام این تغییرات وزن با مسافت چشمگیر است. آثار ضعیف یک پاس فرایند اصطکاکی-اغتشاشی نیز آنقدر قوی نبوده تا باعث افزایش سختی قابل توجه شود و جلوی سایش را بگیرد. با افزایش مسافت مقدار سایش در نمونه خام و یک پاس بدون پودر مثل بقیه نمونه‌ها نیز به محدوده تقریباً ثابتی می‌رسد که می‌تواند ناشی از وجود یک‌نوع تعادل بین جسم ساینده و جسم در حال سایش باشد. پدیده کارسختی در اثر کار مکانیکی و جدا شدن ذرات از دیسک ساینده و افزایش گرما در جسم تحت سایش می‌تواند شرایط سایشی را به حالت تعادلی برساند. میزان کاهش وزن کل در نمونه‌ها پس از 3000 متر مسافت می‌تواند معیار خوبی برای قایسه مقاومت سایشی نمونه‌ها باشد. با توجه به اینکه با افزایش مقاومت سایشی میزان کاهش وزن کمتر می‌شود می‌توان با تقسیم میزان کاهش وزن نمونه اولیه بر کاهش وزن بقیه نمونه‌ها به اعدادی برای مقایسه تمامی نمونه‌ها رسید. با توجه به این فرض با انجام فرایند اصطکاکی 1 پاسه بدون مواد تقویت‌کننده، کاهش وزن از 98.4 در نمونه اولیه به 82.7 میلی گرم می‌رسد بنابراین مقاومت سایشی عملاً نسبت به فلز اولیه 1.19 برابر شده است. بر این اساس مقاومت نمونه‌های حاوی TiB_2 با 2 و 4 پاس نسبت به نمونه اولیه به ترتیب 1.52 و 2.46 برابر شده است. این مقاومت در نمونه‌های حاوی پودر نانولوله و 1 و 2 و 4 پاس نیز نسبت به نمونه اولیه به ترتیب 1.35 و 1.91 و 3.58 برابر شده است. با توجه به اعداد ذکر شده مشخص است که استفاده از ذرات تقویت‌کننده و افزایش پاس تا چه حد می‌تواند بر مقاومت سایشی آلیاژها مؤثر باشد همچنین اثر نوع ذرات تقویت‌کننده بر مقاومت سایشی را در تعداد پاس ثابت می‌توان باهم مقایسه کرد. با توجه به این مطلب و مقایسه 3.58 با 2.46 نشان می‌دهد که در 4 پاس اثر ذرات نانولوله کربنی تقریباً 1.45 برابر

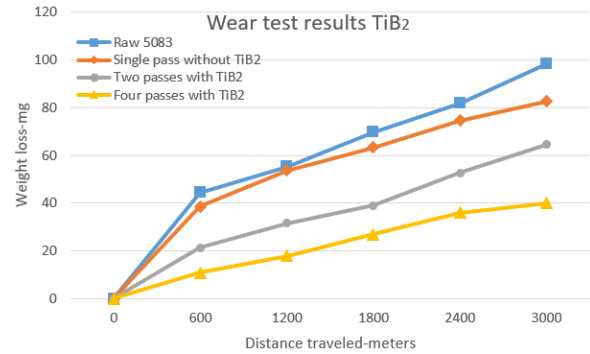


Fig 8 Graph of weight loss of samples containing TiB2 powder

شکل 8 نمودار کاهش وزن نمونه‌های حاوی پودر TiB_2

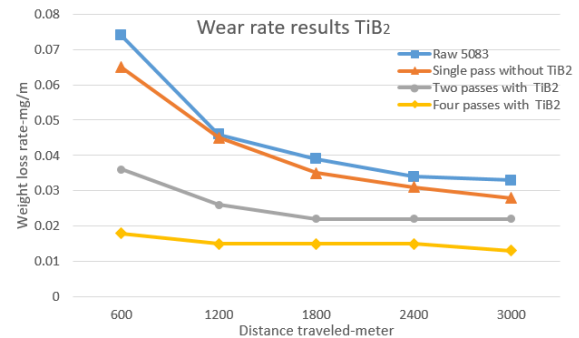


Fig 9 Graph of wear rate with pin sliding distance in samples containing TiB2 powder

شکل 9 نمودار نرخ سایش با مسافت لغزش پین در نمونه‌های حاوی پودر TiB_2

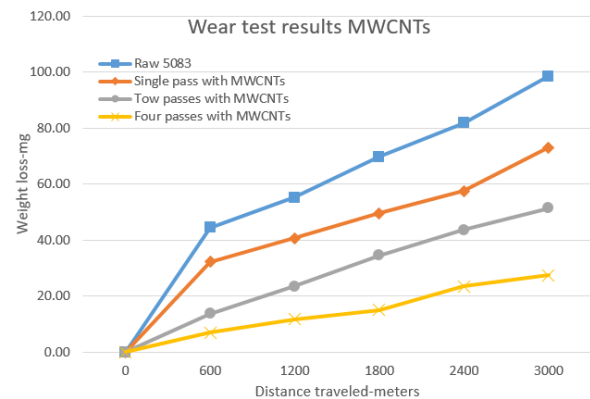


Fig 10 Graph of weight loss of samples containing MWCNT powder

شکل 10 نمودار کاهش وزن نمونه‌های حاوی پودر MWCNT

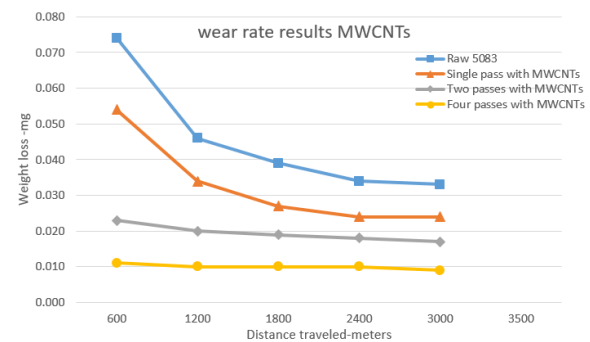


Fig 11 Graph of wear rate with pin sliding distance in samples containing MWCNT powder

شکل 11 نمودار نرخ سایش با مسافت لغزش پین در نمونه‌های حاوی پودر MWCNT

- [3] El-Sayed, M. M., Shash, A. Y., Abd-Rabou, M., & ElSherbiny, M. G., "Welding and processing of metallic materials by using friction stir technique: A review," *Journal of Advanced Joining Processes*, No. 3, pp. 100059, 2021.
- [4] Khademi, A.R., and Afsari, A., "Fabrications of surface nanocomposite by friction stir processing to improve mechanical and microstructural properties of low carbon steel," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 70, No.5, pp.1193-1198, 2017.
- [5] Rabiezadeh, A., & Afsari, A., "Effect of nanoparticles addition on dissimilar joining of aluminum alloys by friction stir welding," *In Persian, Journal of Welding Science and Technology of Iran*, Vol.4, No.2, pp. 23-34, 2019.
- [6] Rabiezadeh, A., Afsari A., Bahmani A., and Sohrabzadeh S., "Effects of friction stir processing on mechanical, tribological and corrosion resistance of low carbon steel." *In Persian*, Vol.48, No.3, pp.115-124, 2018.
- [7] Rabiezadeh, A., and A. Afsari. "Effect of Strengthening Particles on Microstructure and Tribological Properties of Aluminum Based Nano-composites." *In Persian, Nanomaterials*, Vol. 8, No.25, pp. 1-10, 2016.
- [8] Rabiezadeh, A., Afsari, A., Mohammadi M., "Production and investigation of properties of aluminum surface nanocomposite /carbon nanotube (Al-CNT) produced by friction-stir process," *In Persian, Journal of New Materials*, Vol.3, No.2, pp. 13-23, 2012.
- [9] Izadi, H. and Gerlich, A.P., "Distribution and stability of carbon nanotubes during multi-pass friction stir processing of carbon nanotube/aluminum composites". *Carbon*, Vol. 50, No. 12, pp. 4744-4749. 2012.
- [10] Rajakumar, S., Balasubramanian V., "Establishing relationships between mechanical properties of aluminum alloys and optimized friction stir welding process parameters," *Materials and Design*, No. 40, pp.17-35. 2012.
- [11] Zhang, Q., Xiao, B. L., Wang, Q. Z., & Ma, Z. Y., "In situ Al₃Ti and Al₂O₃ nanoparticles reinforced Al composites produced by friction stir processing in an Al-TiO₂ system." *Materials Letters*, Vol. 65, No.13, pp. 2070-2072, 2011.
- [12] Teo, G. S., Liew, K. W., & Kok, C. K., "A Study on Friction Stir Processing Parameters of Recycled AA 6063/TiO₂ Surface Composites for Better Tribological Performance." *Metals*, Vol. 12, No.6, pp. 973, 2022.
- [13] Devaraju, A., Kumar A., Kotiveerachari B., "Influence of rotational speed and reinforcements on wear and mechanical properties of aluminum hybrid composites via friction stir processing." *Materials and Design*, No.45, pp. 576-585, 2013.
- [14] Rabiezadeh, A., and Afsari, A. "Production of Dispersed Ceramic Nano-Particles in Al Alloy Using Friction Stir Processing." *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, Vol.5, No. 3, pp. 41-57, 2016.
- [15] Sadoun, A., Ibrahim, A., & Abdallah, A. W., "Fabrication and evaluation of tribological properties of Al₂O₃ coated Ag reinforced copper matrix nanocomposite by mechanical alloying." *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 8, No.4, pp. 1228-1238, 2020.
- [16] Devaraju, A., Kumar A., Kumaraswamy A, Kotiveerachari B., "Influence of reinforcements (SiC and Al₂O₃) and rotational speed on wear and mechanical properties of aluminum alloy 6061-T6 based surface hybrid composites produced via friction stir processing." *Materials and Design*, Vol. 51, pp.331-341. 2013.
- [17] Yazdipour, A., and Dehghani, K., "Modeling the microstructural evolution and effect of cooling rate on the Nano-grains formed during the friction stir processing of Al5083." *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 1-2, pp.192-197, 2009.
- [18] Shadler, L. S., "Polymer based and polymer-filled nanocomposites", *Nanocomposites science and technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2004
- [19] Pradeep, P. Samuel Ratna Kumar, P. S., Lawrence D., Jayabal S., "Characterization of particulate reinforced aluminum 7075/Tib2 composites", *Int. J.of civil Eng. And Technology*, Vol. 8, No.9, pp178-190, 2017

قوی‌تر از اثر ذرات TiB₂ در افزایش مقاومت سایشی بوده است. یک تعبیر دیگر از این اعداد می‌تواند این باشد که عمر کاری قطعات در شرایط سایشی با پودر نانولوله کربنی و انجام 4 پاس فرایند می‌تواند تا 3.5 برابر افزایش یابد.

4- نتیجه‌گیری

تولید نانو کامپوزیت‌های سطحی آلیاژ آلومینیوم 5083 با پودر دی‌بوراید-تیتانیوم و آلیاژ آلومینیوم 5083 با نانولوله با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با پارامترهای فرآیندی ثابت قطر پین و شانه ابزار، زاویه کنگلی دستگاه و در نهایت سرعت پیشروی 31 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ابزار 1600 دور بر دقیقه با موفقیت انجام پذیرفت. هندسه انتخاب شده ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی جهت تولید نانو کامپوزیت‌ها مورد مطالعه در این روش تجربی با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت نتایج زیر حاصل گردید:

- اجرای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بدون پودر بر روی آلیاژ آلومینیوم 5083، از طریق ریز کردن ساختار و افزایش چگالی نایجایی‌ها موجب افزایش اندازه سختی در ناحیه اغتشاش یافته تا 89.8 ویکرز (4.4 درصد افزایش سختی) گردیده است.
- ترکیب نانو پودرهای دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله در سطح آلیاژ آلومینیوم 5083 به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی منجر به بهبود ریزساختار از طریق کاهش اندازه دانه و در نتیجه افزایش مقدار سختی در نانو کامپوزیت سطحی حاصل شده نسبت به فلز پایه گردیده است.
- اجرای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با تعداد پاس‌های بالاتر منجر به حداکثر 32.3 درصد افزایش سختی در نانو کامپوزیت سطحی حاصل از پودر نانولوله کربنی و حداکثر 21.6 درصد افزایش در سختی نمونه حاوی پودر دی‌بوراید تیتانیوم نسبت به فلز پایه گردیده است.
- نمونه‌های حاصل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در نمونه چهار پاس با نانولوله، حداکثر سختی تقریباً 8 درصد و سختی متوسط حدود 6.5 درصد بیش از سختی نمونه حاصل از نمونه چهار پاس با پودر دی‌بوراید تیتانیوم می‌باشد.
- ارزیابی کاهش وزن و نرخ سایش در آزمایش مقاومت به سایش به روش پین بر روی دیسک در نمونه‌های یک، دو چهار پاس ابزار، در کامپوزیت‌های حاصل از نانولوله و دی‌بوراید تیتانیوم نشان داد که افزایش تعداد پاس‌ها در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی باعث بهبود خواص سایشی نانو کامپوزیت‌های سطحی آلومینیوم 5083 با نانولوله و آلومینیوم 5083 با دی‌بوراید تیتانیوم در مقایسه با آلیاژ خام پایه گردید.
- مقایسه رفتار سایشی در نمونه‌های حاصل از پودرهای دی‌بوراید تیتانیوم و نانولوله‌های کربنی نشان داد که وجود این نانو پودرها منجر به بهبود خواص سایشی در مقایسه با نمونه بدون پودر شده است. با اعمال پودر دی‌بوراید-تیتانیوم و نانولوله کربنی، میزان سایش در 4 پاس به ترتیب 61 درصد و 73 درصد نسبت به نمونه خام کاهش پیدا کرده است و نمونه حاوی نانولوله کربنی پس از 4 پاس، مقاومتی سایشی 45 درصد بزرگ‌تر از نمونه حاوی دی‌بوراید تیتانیوم در تعداد پاس مشابه داشته و می‌تواند عمر کاری این قطعات آلومینیومی در معرض سایش را تا 3.5 برابر افزایش دهد.

5- منابع

- [1] Mishra, R. S., and Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing." *Materials science and engineering: R: reports*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [2] Węglowski, M. S., "Friction stir processing-State of the art," *Archives of civil and Mechanical Engineering*, Vol. 18, No.1, pp. 114-129, 2018.