

# تأثیر افزودن نانوصفحات دی سولفید تنگستن بر روی ریزساختار و خواص سایشی آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn تولید شده به روش متالورژی پودر

چکیده

در این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی (میکروسختی و سایش) نانو کامپوزیت‌های با زمینه Al-8Si-3Cu-2Zn به همراه درصدهای وزنی ۰، ۲ و ۵ درصد وزنی از نانوصفحات دی سولفید تنگستن پرداخته شده است. نانو کامپوزیت مورد بررسی از طریق روش آسیای مکانیکی و پرس گرم تحت دمای ۵۱۰ درجه سانتی گراد تولید شده است. ریزساختارهای پودر ها قبل و بعد از آسیای مکانیکی و نمونه های تف جوشی شده از طریق میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی سطوح ساییده شده پس از تست سایش توسط میکروسکوپ الکترونی علت کاهش وزن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که با افزودن نانوصفحات دی سولفید تنگستن تا ۵ درصد وزنی، میکروسختی نمونه‌ها بیش از دو برابر افزایش پیدا می‌کند و از ۵۰ ویکرز برای Al-8Si-3Cu-2Zn به ۱۰۱ ویکرز برای نانو کامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn-5%WS2 می‌رسد. با توجه به نتایج تست‌های سایش نرخ سایش برای Al-8Si-3Cu-2Zn-5%WS2 به ترتیب به مقدار ۳۲ درصد نسبت به زمینه آلیاژی Al-8Si-3Cu-2Zn کاهش پیدا کند. بنابراین از نانو کامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn-5%WS2 می‌توان به عنوان یک نانو کامپوزیت خود روانکار با خواص سایشی مطلوب استفاده کرد.

کلیدواژگان

نانو کامپوزیت زمینه آلومینیومی، خواص مکانیکی، نرخ سایش، پرس گرم

## The effect of adding tungsten disulfide nanosheets on the microstructure and wear properties of Al-8Si-3Cu-2Zn alloy produced by powder metallurgy method

### Abstract

In this research, the mechanical properties (microhardness and wear) of Al-8Si-3Cu-2Zn nanocomposites with 0, 2, and 5% by weight of tungsten disulfide nanoplates have been investigated. The studied nanocomposite was produced through mechanical grinding and hot pressing at a temperature of 510 degrees Celsius. The microstructures of powders before and after mechanical grinding and sintered samples were studied through electron microscopy (SEM). By examining the worn surfaces after the wear test by electron microscope, the cause of weight loss was investigated. The results show that by adding tungsten disulfide nanoplates up to 5% by weight, the microhardness of the samples increases more than twice and from 50 Vickers for Al-8Si-3Cu-2Zn to 101 Vickers for Al-8Si-3Cu-2Zn nanocomposite reaches 5% WS<sub>2</sub>. According to the results of the wear tests, the wear rate for Al-8Si-3Cu-2Zn-5% WS<sub>2</sub> will decrease by 32% %, compared to the Al-8Si-3Cu-2Zn alloy background. Therefore, Al-8Si-3Cu-2Zn-5% WS<sub>2</sub> nanocomposite can be used as a self-lubricating nanocomposite with favorable wear properties.

Keywords: Aluminum-based nanocomposite, mechanical properties, wear rate, hot pressing

در دو دهه گذشته توجه زیادی به استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی با توجه به کاربردهای گسترده آن‌ها در صنایع مختلف شده است [۱-۳]. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به عنوان تقویت‌کننده جهت تولید نانوکامپوزیت می‌تواند به طور قابل توجهی خصوصیات ماده زمینه را بهبود ببخشد [۴-۸]. در سال‌های اخیر نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با توجه به خواص بی‌نظیر شان از جمله چگالی پایین، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش عالی و مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب، کاربرد روز افزونی در صنایع نظامی، هوا و فضا و همچنین اتوموبیل‌های نسل جدید پیدا کرده اند [۹-۱۳].

بسیاری از محققان به منظور افزایش خواص مکانیکی، سایشی و گرمایی نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی از عوامل تقویت‌کننده متفاوتی مثل سیلیسیوم کارباید (SiC)، اکسید آلومینیوم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، کارباید برون (B<sub>4</sub>C) و کارباید تیتانیوم (TiC) استفاده کرده اند [۳، ۵، ۱۲ و ۱۳]. در این تحقیق از تنگستن دی سولفید به عنوان فاز تقویت‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است. نانو ذرات تنگستن دی سولفید به علت خواص روان کننده بی‌نظیری که دارند، در محیط‌های سخت و تحت فشارهای بالا، وزن بی نهایت و یا خلا کاربرد های ارزشمندی را پیدا می‌کنند [۱۵]. نانوذرات تنگستن دی سولفید در تماس‌های سطحی با فلزات حتی در دما و فشار بالا عملکرد بسیار خوبی از لحاظ خواص تریبولوژی از خود نشان می‌دهند [۱۶].

در سال‌های اخیر از روش‌های متعددی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی نظیر متالورژی پودر، آلیاژسازی مکانیکی، ریخته‌گری و تفجوشی پلاسمای جرقه ای (SPS) به کار گرفته شده است. روش متالورژی پودر به علت دقت بالا برای تولید نمونه‌های یکسان و با ابعاد هندسی پیچیده بسیار مورد توجه می‌باشد [۹]. تولید نانوکامپوزیت با استفاده از روش مرسوم متالورژی پودر دارای نقاط ضعفی از جمله خطوط اتصال نه چندان مستحکم بین فاز تقویت‌کننده و فاز زمینه و همچنین توزیع غیر-یکنواخت نانوذرات در زمینه فلزی می‌باشد [۱۷]. روش پرس گرم که یکی از روش‌های پیشرفته در علم متالورژی پودر محسوب می‌شود به خوبی بر این معایب غلبه می‌کند و توزیع یکنواخت نانوذرات در فاز زمینه را امکان‌پذیر می‌سازد [۱۸]. در این روش ابتدا پودرها داخل قالب فلزی سخت‌کاری شده ریخته می‌شود و در دستگاه پرس گرم قرار داده می‌شود. در ادامه پودرها داخل قالب به صورت تدریجی تا رسیدن به دمای تف جوشی تعیین شده، تحت فشار معین پرس می‌گیرند [۱۹ و ۲۰]. از این رو در این پژوهش از روش پرس گرم به منظور تولید نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است. قابل ذکر می‌باشد، با توجه به نبود اطلاعات دمای تفت جوشی به منظور تولید نانوکامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn تقویت‌شده با نانو پودرهای تنگستن دی سولفید مناسب از طریق پرس گرم، از مشکلات ساخت این نانوکامپوزیت بوده که نیازمند ساخت و بررسی در دماهای تفت جوشی متفاوت بوده است.

اگرچه محققان زیادی نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی متفاوتی را تولید کردند و خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند، تولید نانوکامپوزیت Al-8Si-3Cu-2Zn-WS<sub>2</sub> برای نخستین بار است که در این پژوهش انجام شده است. در این تحقیق هدف تولید نانوکامپوزیت با زمینه آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn تقویت‌شده با نانوصفحات دی سولفید تنگستن (۰، ۲ و ۵ درصد وزنی) می‌باشد. آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn به دلیل سختی و خواص سایش خوب به عنوان ماده زمینه انتخاب می‌شود. علاوه بر این، این یک آلیاژ سبک در مقایسه با آلیاژ برنج، مس و فولاد است. نانوکامپوزیت‌های

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn با ترکیب شیمیایی مشخص شده در جدول ۱ با ابعاد ۴۰ میکرومتر و خلوص ۹۹ درصد به عنوان فاز زمینه و از دی سولفید تنگستن با ابعاد ۹۰ نانومتر و خلوص ۹۹ درصد به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شده است. در این تحقیق برای ساخت نمونه پودر آلیاژی، پودرهای خالص آلومینیوم، سیلیسیم، مس و روی به مدت ۴۰ ساعت در دستگاه آسیاکاری مکانیکی مخلوط شدند که در نهایت پودر آلیاژی بدست آمد. در شکل ۱ تصویر مواد استفاده شده در این تحقیق با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ Al-8Si-3Cu-2Zn به عنوان پودر زمینه.  
Table 1. Chemical composition of Al-8Si-3Cu-2Zn alloy as matrix powder.

Substance	Al	Si	Cu	Zn	Cu
Wt.%	Bal	8	3	2	0.05

در این تحقیق فرآیند تولید نانوکامپوزیت به این صورت می‌باشد که ابتدا پودر آلیاژی آلومینیوم به همراه درصد های ۲ و ۵ از دی سولفید تنگستن در دستگاه آسیاب سیاره‌ای دو مخزن که ظرفیت هر کدام ۳۰ گرم می‌باشد، با استفاده از گلوله‌هایی با ابعاد متفاوت با قطر های ۳-۱۰ میلی‌متر به مدت ۱۰ ساعت آسیاکاری می‌شوند. ۱/۵ درصد اسید استناریک به عنوان کنترل فرآیند و جلوگیری از جوش سرد به پودرها اضافه می‌شود. نسبت گلوله به پودر ۱:۱۰ و سرعت آسیاکاری ۲۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. سپس پودرهای آسیاکاری شده در داخل قالب فولاد سخت شده با جنس فولاد اسپیکار ریخته می‌شود و در دستگاه مخصوص پرس گرم به مدت ۳۰ دقیقه تا رسیدن به دمای ۵۱۰ درجه سانتیگراد در محیط آرگون قرار می‌گیرد.

به منظور ارزیابی ریزساختار نمونه ها از روش استاندارد متالوگرافی ASTM E3-01 استفاده شد. نمونه ها توسط کاغذ سنباده شماره ۲۰۰۰ متالوگرافی شدند و برای صاف شدن سطح نمونه پولیش شدند و سپس توسط محلولی که حاوی ۸۲ میلی لیتر H<sub>2</sub>O، ۱۵.۵ میلی لیتر HNO<sub>3</sub>، ۰.۵ میلی لیتر HF اچ شدند. برای مطالعه ریزساختار نمونه ها از میکروسکوپ نوری مدل Unione و میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) استفاده شد.

علاوه بر این، اندازه‌گیری اندازه دانه با استفاده از آنالیز تصویر انجام شد. ریزسختی ویکرز نمونه‌ها با استفاده از تجهیزات Buehler با اعمال بار ۲۰۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه اندازه‌گیری شد. خواص سایشی نمونه‌های استاندارد ASTM بعد از پرس گرم از طریق روش پین روی دیسک بر طبق استاندارد ASTM G99 مورد بررسی قرار گرفت. در این تست بارگذاری ۵ نیوتون و مسافت ۱۰۰۰ متر معین شد. به منظور محاسبه کاهش وزن نمونه‌ها، وزن پین و دیسک قبل و بعد از انجام آزمایش به طور دقیق توسط ترازوی الکترونی حساس اندازه‌گیری شد. ضریب اصطکاک به طور مرتب با توجه به بارگذاری در طول مسافت طی شده محاسبه شده است. در پایان پس از تست، سطوح ساییده شده توسط میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مطالعات ریزساختاری

اندازه اولیه ذرات پودر آلایژی آلومینیوم قبل از عملیات آسیاکاری، کروی شکل و به اندازه ۵۰ میکرومتر دیده شد. بعد از ۱۰ ساعت عملیات آسیاکاری اندازه ذرات پودر آلایژی به ۴۰ میکرومتر کاهش پیدا کرد. بدیهی است کاهش اندازه ذرات منجر به تراکم کمتر و انحلال مناسب‌تر در فرآیند پرس گرم می‌شود. در شکل ۲ عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) از مورفولوژی پودرهای نانوکامپوزیتی بعد از ۱۰ ساعت آسیاکاری نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، بعد از آسیاکاری، مورفولوژی پودرهای آلایژی به علت تغییر شکل پلاستیک شدید به شکل لایه لایه و فلسی تبدیل می‌شود. در شکل ۳ به وضوح مشخص است که نانوذرات دی سولفید تنگستن در بین ذرات پودر آلایژی مسطح قرار گرفته و به طور یکنواخت در بین آن‌ها توزیع شده اند. فرایند آسیاکاری مکانیکی و تولید نمونه‌های نانوکامپوزیتی با پرس گرم می‌تواند بر توزیع یکنواخت نانوذرات تقویت‌کننده در زمینه تاثیر به‌سزایی داشته باشد [۲۱ و ۲۲].

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، آسیاب کاری باعث پخش یکنواخت نانوصفحات دی سولفید تنگستن بر روی پودرهای آلایژی آلومینیوم شده است. در این روش نانو صفحات بر روی پودرهای آلومینیوم بصورت مکانیکی اتصال پیدا می‌کنند و باعث می‌شوند در حین پرس گروم و تف جوشی آگلومره شدن نانوصفحات ایجاد نشود. در نهایت پخش شدن نانوصفحات بصورت یکنواخت باعث بهبود خواص سایشی نانوکامپوزیت خواهد شد. چون نانوصفحات وقتی آگلومره می‌شوند علاوه بر کاهش قدرت تقویت‌کنندگی خود در داخل زمینه، به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل کرده و خواص سایشی را کاهش می‌دهند و نانوکامپوزیت دقیقاً از محل تمرکز تنش کندگی اتفاق افتاده و کاهش وزن افزایش پیدا می‌کند.

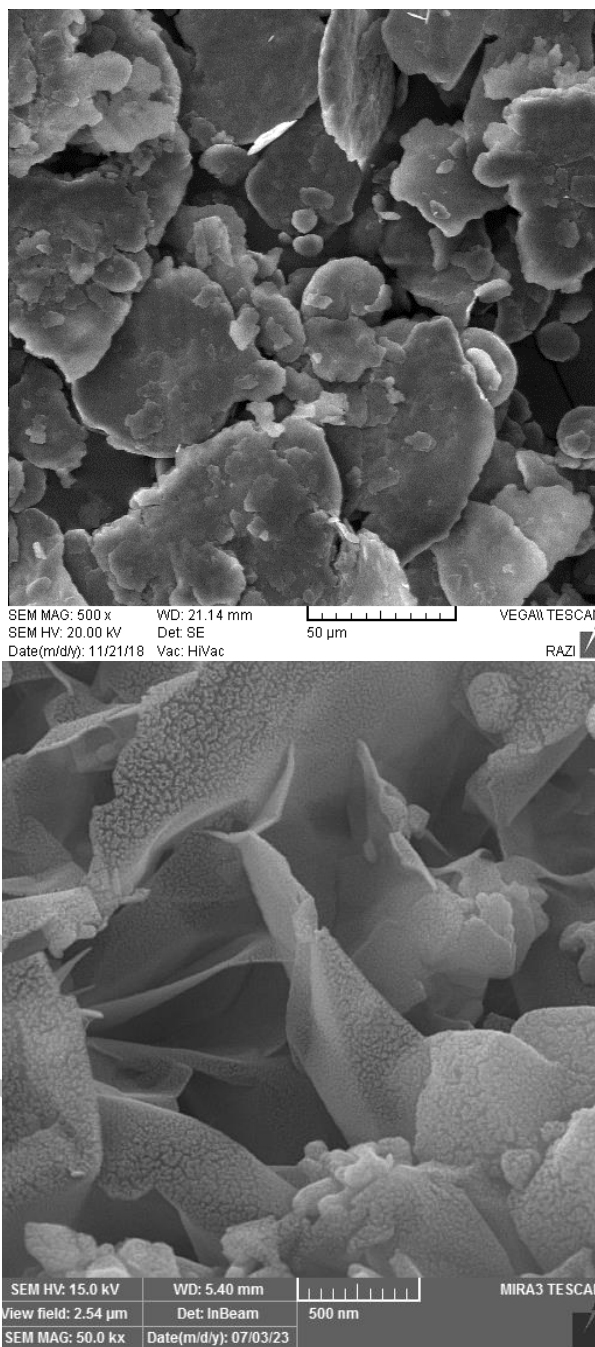


Figure 1-a) Background powder after 40 hours of mechanical alloying, b) WS2 nanosheets.

شکل ۱- الف) پودر زمینه بعد از ۴۰ ساعت آلایزسازی مکانیکی، ب) نانوصفحات WS2.

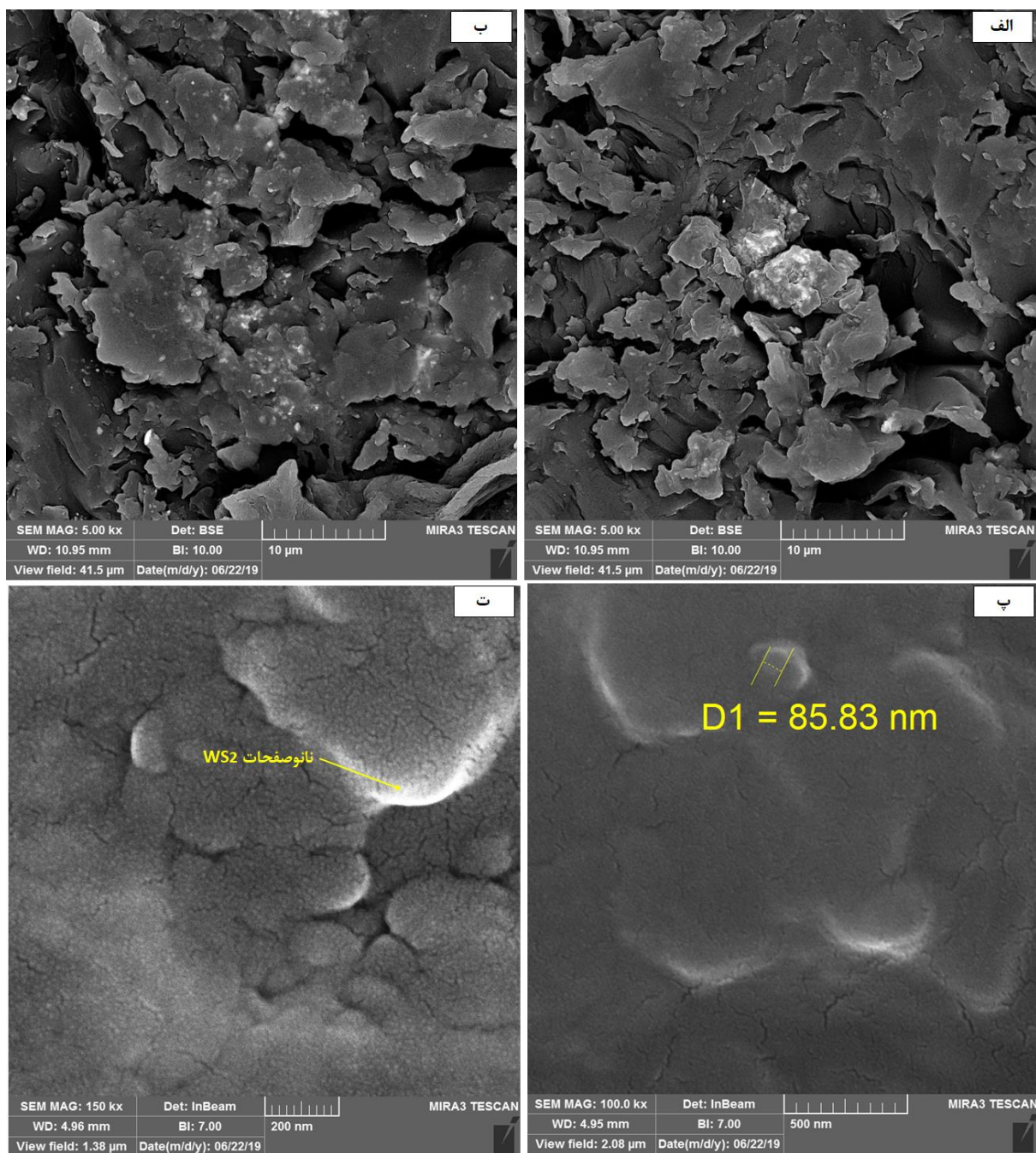


Figure 2- a) aluminum powder containing 2% of WS2 nanoplates, b) aluminum powder containing 5% of WS2 nanoplates, p and d) WS2 nanoplates inside aluminum powders.

شکل ۲- الف) پودر آلومینیوم حاوی ۲ درصد نانوصفحات WS2، ب) پودر آلومینیوم حاوی ۵ درصد نانوصفحات WS2، پ و ت) نانوصفحات WS2 داخل پودرهای آلومینیوم.

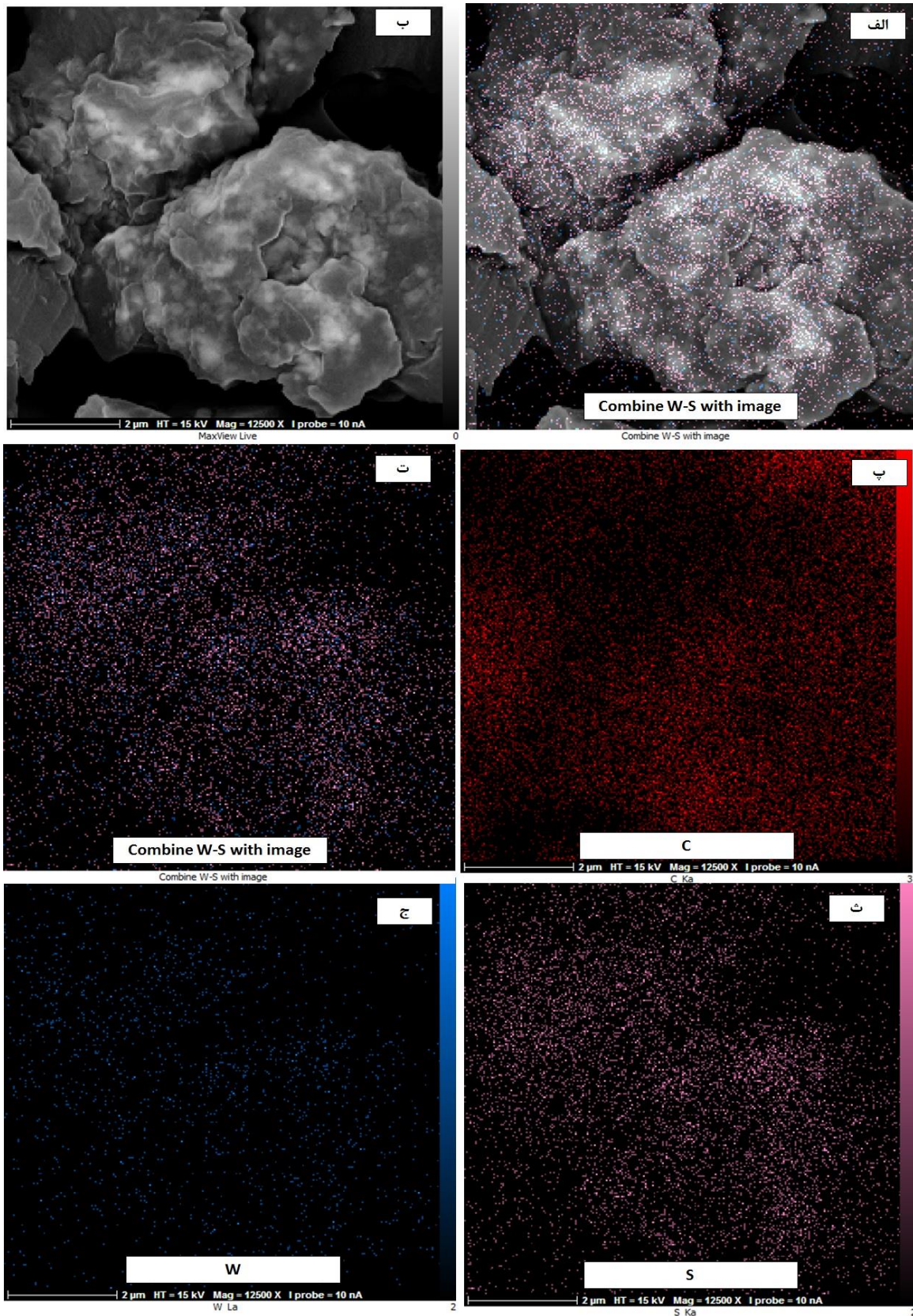


Figure 3- Aluminum powder after 10 hours of grinding and how to spread nanoplates on aluminum powder.

شکل ۳- پودر آلومینیوم بعد از ۱۰ ساعت آسیاکاری و نحوه پخش نانوصفحات بر روی پودر آلومینیوم.

و همین‌طور اندازه دانه‌های بسیار مطلوب‌تر شود که با کاهش اندازه دانه استحکام و سختی افزایش می‌یابد [۲۳].

جدول ۲- نتایج سختی نمونه‌های نانوکامپوزیت در شرایط مختلف

**Table 2- Hardness results of nanocomposite samples in different conditions**

نمونه جوشکاری شده	میکروسختی نمونه‌ها-ویکرز
نمونه پایه	۵۰
۲ درصد WS2	۷۲
۵ درصد WS2	۱۰۱

### ۳-۳- رفتار سایشی

جدول ۳ نرخ سایش به دست آمده از آزمایش سایش پین روی دیسک را نشان می‌دهد. نرخ سایش با توجه به چگالی نمونه، مسافت طی شده و مقدار کاهش وزن پین در حین انجام تست سایش محاسبه شد. با توجه به نمودار، نرخ سایش از  $74 \text{ mm}^3/\text{Km}$  برای زمینه آلیاژی Al-8Si-3Cu-2Zn به  $51 \text{ mm}^3/\text{Km}$  برای نانوکامپوزیت 2% WS2 Al-8Si-3Cu-2Zn کاهش چشمگیری پیدا کرده است. این کاهش در نرخ سایش می‌تواند به علت حضور فاز تقویت‌کننده و ایجاد لایه مخلوط مکانیکی (لایه شامل اکسیدهای مختلف) که نقش روانکار را ایفا میکند باشد. علاوه بر این طبق معادله ارچارد با افزایش سختی نرخ سایش کاهش پیدا می‌کند [۲۵].

جدول ۳- نتایج نرخ سایش نمونه‌های نانوکامپوزیت در شرایط مختلف

**Table 3- Wear rate results of nanocomposite samples in different conditions**

نمونه جوشکاری شده	نرخ سایش نمونه‌ها- $\text{mm}^3/\text{Km}$
نمونه پایه	۷۴
۲ درصد WS2	۵۱
۵ درصد WS2	۵۹

در شکل ۵ تصاویر سطوح سایش نمونه‌های مختلف نانوکامپوزیت که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده است را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، شیارهای کوچک به وجود آمده در آلیاژ پایه Al-8Si-3Cu-2Zn در مکانیزم سایش بیانگر تغییر شکل پلاستیک و لایه لایه شدگی در سطح سایش می‌باشد. تحت بارگذاری ۵ نیوتون، با توجه به دو ناحیه انتخاب شده در سطوح سایش، حفره‌ها و نواحی صاف در شکل مشخص شده اند. لایه‌های جدا شده در شکل دهانه‌ها یا حفره‌ها بیانگر سایش چسبناک به علت تشکیل و شکسته شدن میکروجوش‌ها در طی انجام آزمایش است. به نظر می‌رسد در ابتدای مسافت مورد نظر برای آزمایش سایش، سایش لایه ای یک مکانیزم غالب برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی به شمار می‌رود. می‌توان گفت زمینه آلیاژی Al-8Si-3Cu-2Zn بدون نانوذرات تقویت‌کننده با مورفولوژی دندردستی درشت، می‌تواند به راحتی شکسته شود و در نهایت به کاهش وزن زیاد منجر شود.

ضرایب اصطکاک (COF) تحت شرایط بارگذاری برای نانوکامپوزیت‌های مختلف با درصد‌های وزنی مختلف نانوصفحات دی سولفید تنگستن در جدول ۴ نشان داده شده است. مشاهده شده است که در یک بار اعمال شده معین، ضرایب اصطکاک برای نانوکامپوزیت‌های تقویت نشده بیشترین مقدار است. ضرایب اصطکاک با افزایش درصد وزنی دی سولفید تنگستن کاهش می‌یابد.

شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های آماده‌سازی شده متالوگرافی را نشان می‌دهد. در این شکل با توجه به افزایش مقدار نانوذرات دی سولفید تنگستن، اندازه دانه‌های مناسب‌تری در شکل مشاهده می‌گردد. کاهش اندازه دانه به بهبود خواص مکانیکی نانو کامپوزیت منجر می‌شود [۲۷]. روش‌های متعددی برای فرآیند اصلاح دانه‌ها وجود دارد که مهمترین آن استفاده از ذرات ثانویه و اضافه کردن به زمینه است. افزودن نانوذرات WS2 به زمینه آلیاژ به طور قابل توجهی دانه‌های درشت  $\alpha\text{-Al}$  را به دانه‌های هم محوری  $\alpha\text{-Al}$  بهبود بخشیده است.

### ۳-۲- میکروسختی

جدول ۲ مقدار میانگین میکروسختی نمونه‌های تولید شده توسط روش پرس گرم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است بعد از اضافه کردن نانوذرات تا مقدار ۵ درصد وزنی به زمینه، مقدار میکروسختی تقریباً دو برابر شد به طوری که مقدار میکروسختی برای زمینه آلیاژی ۵۰ ویکرز است و برای نانوکامپوزیت 5% WS2 Al-8Si-3Cu-2Zn به میزان ۱۰۱ ویکرز افزایش پیدا کرد.

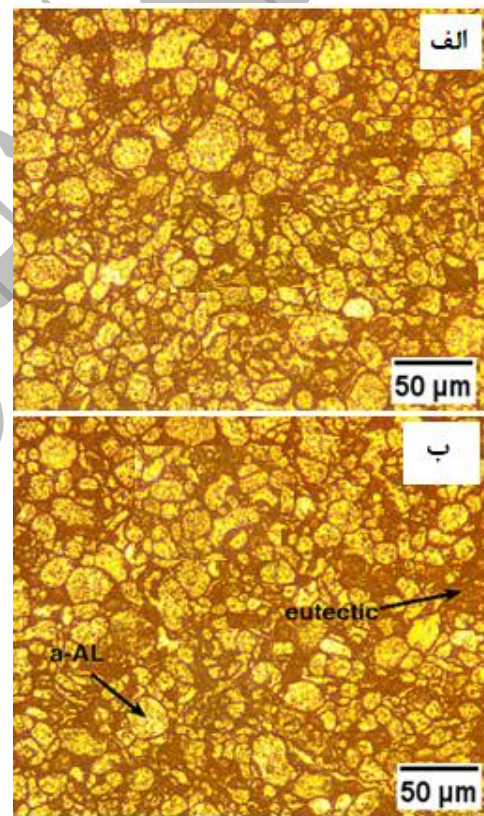


Figure 4- a) aluminum alloy containing 2% WS2 nanoplates, b) aluminum alloy containing 5% WS2 nanoplates after hot pressing.

شکل ۴- الف) آلیاژ آلومینیوم حاوی ۲ درصد نانوصفحات WS2، ب) آلیاژ آلومینیوم حاوی ۵ درصد نانوصفحات WS2 بعد از عملیات پرس گرم.

دو عامل بر روی این افزایش مقدار سختی در نانوکامپوزیت‌ها تأثیر بسیار مهمی دارند. عامل اول، تأثیر سخت‌کاری در عملیات آسیابکاری که به مدت ۱۰ ساعت انجام شده است [۲۰] و منجر به توزیع یکنواخت نانوذرات و افزایش دانسیته نایبایی‌ها در زمینه کامپوزیت شده است و عامل دوم، سختی ذاتی و خواص متفاوت فاز تقویت‌کننده که می‌تواند منجر به چگالی بالاتر

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج زیر از این مطالعه قابل استخراج است:

در این تحقیق نانوکامپوزیت زمینه فلزی با زمینه Al-8Si-3Cu-2Zn با فاز تقویت کننده نانو صفحات دی سولفید تنگستن با درصد های وزنی مختلف (۲،۵ و ۱۰ درصد) مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات در مورفولوژی و ریزساختار پودرها بعد از آسیاکاری بحث شد و توزیع یکنواخت نانوذرات در زمینه به خوبی انجام گرفت که منجر به کاهش اندازه ذرات و متعاقبا افزایش تراکم و عملکرد بهتر در فرآیند پرس گرم شد. یافته های تجربی به شرح زیر خلاصه می شود:

۱- مقدار بهینه نانوذرات ۲ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن است.

۲- هنگامی که درصد وزنی نانوکامپوزیت به بیش از ۲ درصد وزنی برسد. تجمع نانوصفحات دی سولفید تنگستن در مرز دانه باعث تردی، تخلخل، پیوند سطحی کمتر و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی می شود.

۳- با این حال، افزایش بیش از حد مقدار نانوصفحات دی سولفید تنگستن باعث تجمع و آگلومره شدن می شود، بنابراین COF و نرخ سایش افزایش می یابد.

۴- مقاومت در برابر سایش نانوکامپوزیت های تولید شده نسبت به نمونه پایه بیشتر بوده و کاهش وزن نمونه پایه نسبت به نمونه بهینه بیشتر می باشد. ضریب اصطکاک به دلیل ماهیت خود روان کننده نانوصفحات دی سولفید تنگستن برای نمونه پایه و نانوکامپوزیت حاوی ۲ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن به ترتیب برابر است با ۰,۷۱۲ و ۰,۵۳۲، که نشان دهنده کاهش ضریب اصطکاک می باشد. همچنین سختی نمونه ها از ۵۰ ویکرز برای نمونه پایه به ۱۰۱ ویکرز برای نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن افزایش می یابد.

۵- انتقال مکانیزم سایش از ترکیب سایش لایه لایه، سایش چسبان و سایش ساینده به سایش خفیف ساینده با افزایش محتوای تقویت کننده نانوصفحات گرافن تا ۲ درصد وزنی وجود داشت.

۶- افزایش محتوای نانوصفحات دی سولفید تنگستن برای تشکیل MML در طول فرآیند لغزش خشک مفید بود که نه تنها می تواند از سطح سائیده محافظت کند بلکه COF نانوکامپوزیت ها را نیز کاهش می دهد.

این به دلیل وجود نانوصفحات تقویت کننده در نانوکامپوزیت است. بیشترین مقدار آسیب نمونه برای حالتی میباشد که هیچ تقویت کننده ای استفاده نشده است. از این رو، مقدار محصولات سایش باقیمانده باید دلیل اصلی بزرگ بودن COF باشد. تقویت کننده نانوصفحات دی سولفید تنگستن به دلیل خاصیت خود روانکاری COF را کاهش داده است.

در حین سایش، نانوصفحات دی سولفید تنگستن از نانوکامپوزیت جدا می شود و یک لایه روان کننده روی سطح بین دو ماده ایجاد می کند که ضریب اصطکاک را کاهش می دهد. هرچه نانوصفحات دی سولفید تنگستن به طور یکنواخت در داخل زمینه پخش شوند، سختی نانوکامپوزیت را بیشتر بهبود می بخشد و ضریب اصطکاک را کاهش می دهد و مقدار سایش را کاهش می دهد. علاوه بر این، برای نانوکامپوزیت ها، به دلیل خواص مکانیکی بالاتر آنها، حفظ پایداری لایه اکسید سطحی آسان تر است و بنابراین منجر به نوسان نسبتا کمتری می شود [۲۳]. در این تحقیق، کاهش اندازه ذرات زمینه از طریق آسیاب گلوله ای منجر به توزیع همگن تقویت کننده ها در زمینه می شود و در نتیجه مقاومت به سایش نانوکامپوزیت ها را افزایش می دهد.

علاوه بر این، نانوکامپوزیت های تولید شده توسط فرآیند آسیاب گلوله ای و به دنبال آن پرس گرم با ۲ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن، حداکثر مقاومت در برابر سایش را ایجاد می کنند. در حالی که ضریب اصطکاک در مورد ۵ درصد وزنی نانوصفحات دی سولفید تنگستن نسبتا بالا است. این ممکن است به دلیل تجمع نانوصفحات دی سولفید تنگستن باشد. نانوصفحات دی سولفید تنگستنی که در داخل زمینه تجمع می یابند به عنوان مراکز تنش در هنگام سایش عمل می کنند و باعث می شوند که قطعه از آن نقطه شکسته شود. این امر باعث کاهش مقاومت به سایش و افزایش نرخ سایش در نمونه های حاوی ۵ درصد نانوصفحات دی سولفید تنگستن می شود.

جدول ۴. ضریب اصطکاک برای آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت ها برای درصد های وزنی مختلف گرافن.

Table 4. Coefficient of friction for base alloy and nanocomposites for different weight percentages of graphene.

Sample	Coefficient of friction
Al-8Si-3Cu-2Zn	0.712
Al-8Si-3Cu-2Zn -2% wt. WS2	0.532
Al-8Si-3Cu-2Zn -5% wt. WS2	0.612

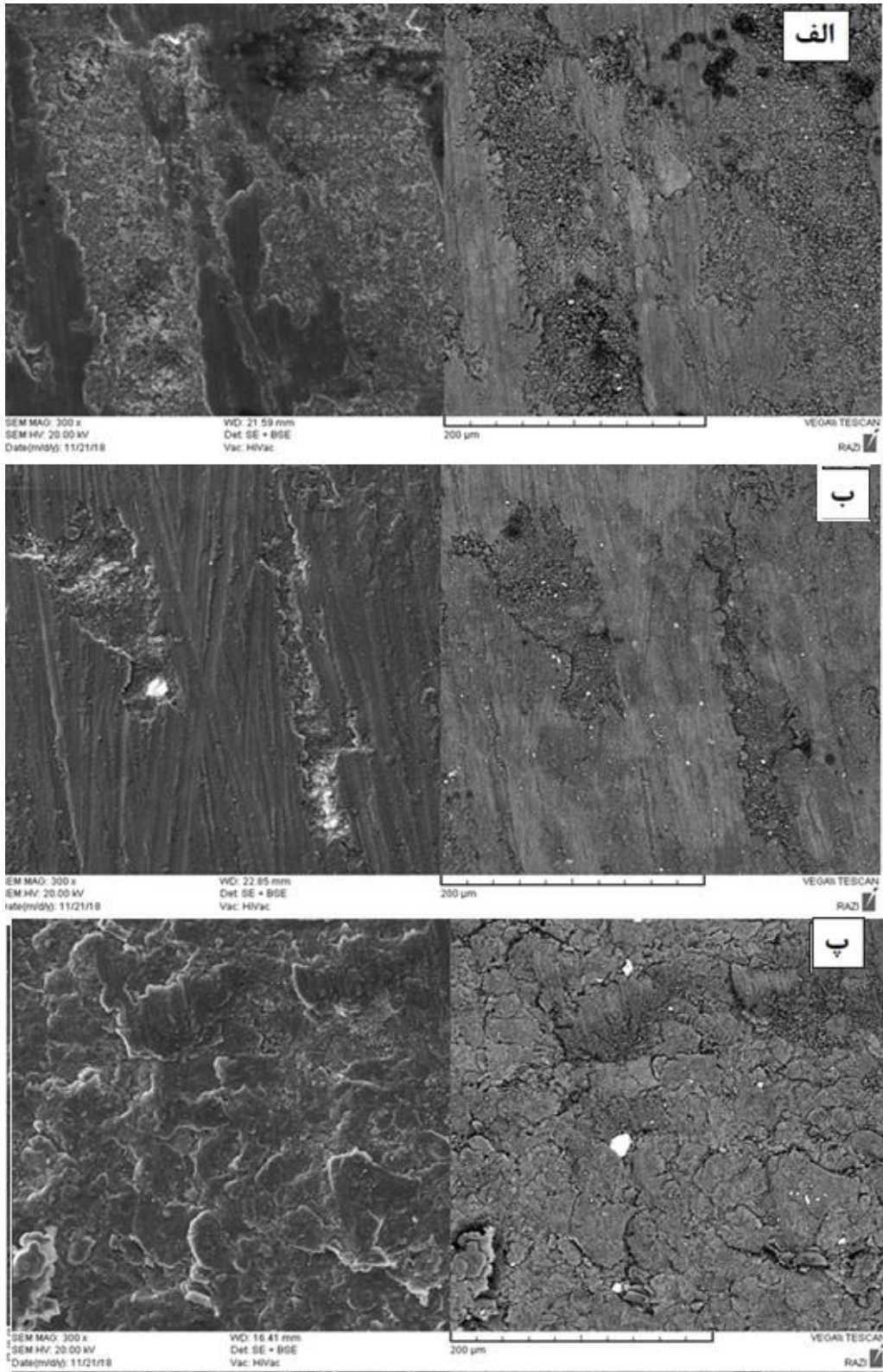


Figure 5- SEM photographs of wear surfaces of nanocomposite samples a) basic, b) containing 2% WS2 nanosheets, c) containing 5% WS2 nanosheets

شکل ۵- عکس های SEM از سطوح ساییش نمونه های نانوکامپوزیت الف) پایه، ب) حاوی ۲ درصد نانوصفحات WS2، پ) حاوی ۵ درصد نانوصفحات WS2



- [17]. Yu-Yang Gao, Feng Qiu, Shu-Li Shu, "Mechanical properties and abrasive wear behaviors of in situ nano-TiC<sub>x</sub>/Al-Zn-Mg-Cu composites fabricated by combustion synthesis and hot press consolidation", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol 16, Pages 179-187, (2019).
- [18]. M. Jafari, M.H. Abbasi, M.H. Enayati, F. Karimzadeh, "Mechanical properties of nanostructured Al<sub>2024</sub>-MWCNT composite prepared by optimized mechanical milling and hot pressing methods", *Adv. Powder Technology*, Vol. 23, pp 205–210, (2012).
- [19]. A. Alizadeh, M. Maleki, A. Abdollahi, "Preparation of super-high strength nanostructured B4C reinforced Al-2Cu aluminum alloy matrix composites by mechanical milling and hot press method: Microstructural", *mechanical and tribological characterization*, Vol. 28 pp 3274-3287, (2017).
- [20]. A. Zolriasatein, R. Khosroshahi, M. Emamy, N. Nemati, "Mechanical and wear properties of Al-Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> nanocomposites prepared by mechanical milling and hot pressing", *Int. J. Miner. Metall. Mater.* Vol. 20, pp 290e297, (2013).
- [21]. P.G. Koppad, H.R.A. Ram, C.S. Ramesh, K.T. Kashyap, R.G. Koppad, "On thermal and electrical properties of multiwalled carbon nanotubes/copper matrix nanocomposites", *J. Alloys Compd.* Vol. 580, pp 527-532, (2013).
- [22]. S.E. Shin, H.J. Choi, J.H. Shin, D.H. Bae, "Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites", *Carbon*, Vol. 82, pp 143-151, (2015).
- [23]. F. Mokdad, D. Chen, Z. Liu, B. Xiao, D. Ni, Z. Ma, "Deformation and strengthening mechanisms of a carbon nanotube reinforced aluminum composite", *Carbon*, Vol. 104, pp 64e77, (2016).
- [24]. N. Hosseini, F. Karimzadeh, M.H. Abbasi, M.H. Enayati, "A comparative study on the wear properties of coarse-grained Al6061 alloy and nanostructured Al6061-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites", *Tribol. Int.* Vol. 54, pp 58–67, (2012).
- [25]. I. Manivannan, S. Ranganathan, S. Gopalakannan, "Tribological and surface behavior of Silicon carbide reinforced aluminum matrix nanocomposite", *Surfaces and Interfaces*, Vol. 8, pp 127-136, (2017).
- [26]. E. Mohammad Sharifi, F. Karimzadeh, M.H. Enayati, "Fabrication and evaluation of mechanical and tribological properties of boron carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites", *Materials and Design*, Vol. 32, pp 3263–3271, (2011).
- [1]. A.B. Elshalakany, T.A. Osman, A. Khattab, B. Azzam, M. Zaki, "Microstructure and mechanical properties of MWCNTs reinforced A356 aluminum alloys cast nanocomposites fabricated by using a combination of rheocasting and squeeze casting techniques", *J. Nanomater.* pp. 1-10 (2014).
- [2]. X.D. Liu, S.A. Jia, L. Nastac, "Ultrasonic cavitation-assisted molten metal processing of cast A356-nanocomposites", *Int. J. Metalcasting, AFS*, pp.51–58, (2014).
- [3]. Omya El-Kady A. Fathy, "Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites", *Materials and design*, vol. 54, pp. 348-353, (2014).
- [4]. Yang Xuan, Laurentiu Nastac, "The role of ultrasonic cavitation in refining the microstructure of aluminum based nanocomposites during the solidification process", *Ultrasonics*, vol. 83, pp. 94–102, (2018).
- [5]. S Ahmadifard, A Heidarpour, S Kazemi, "The effects of Pass number and Nano-Size ZrO<sub>2</sub> powder on the Mechanical, Microstructure and Wear behavior in Friction Stir Welding of the Al-5083", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18 (3), 219-227, (2018).
- [6]. P.K. Dinesh Kumar, S. Darius Gnanaraj, "Studies on Al-Si based hybrid aluminium metal matrix nanocomposites", *Materials Today Communications*, Vol. 38, 108132, (2024).
- [7]. S. Kiani, S. Ehsan Mirsalehi, "Friction stir additive manufacturing of B4C and graphene reinforced aluminum matrix hybrid nanocomposites using consumable pins", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 28, Pages 1094-1110, (2024).
- [8]. S.S. Mirian Mehrian, F. Khodabakhshi, M. Rahsepar, M. Mohammadi, A.P. Gerlich, "Electrochemical corrosion characteristics of friction stir-reacted aluminum matrix hybrid nanocomposites", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 28, Pages 1924-1940, (2024).
- [9]. P. Raj, P.L. Biju, B. Deepanraj, N. Menachery, "A systematic review on characterization of hybrid aluminium nanocomposites", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 72, Part 4, pp. 2139-2150, (2023).
- [10]. J.J.S. Dilip, M. Koilraj, V. Sundareswaren, G.D. Janaki Ram, and S.R. Koteswara Rao, "Microstructural characterization of dissimilar friction stir welds between AA2219 and AA5083", *Trans. Indian. Inst. Metals*, vol. 63(3), pp 757–64, (2010).
- [11]. R. Abedinzadeh, E. Norouzi, D. Toghraie, "Study on machining characteristics of SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced aluminum hybrid nanocomposite in conventional and laser-assisted turning", *Ceramics International*, Vol. 48, pp 29205-29216, (2022).
- [12]. S. Ozkaya, A. Canakci, "Effect of the B4C content and the milling time on the synthesis, consolidation and mechanical properties of AlCuMg-B4C nanocomposites synthesized by mechanical milling", *Powder Technology*, vol. 297, pp 8-16, (2016).
- [13]. G.S.P. Kumar, P.G. Koppad, R. Keshavamurth, M. Alipour, "Microstructure and mechanical behaviour of in situ fabricated AA6061-TiC metal matrix composites", *Arch Civ. Mech. Eng.* Vol. 17, pp 535-544, (2017).
- [14]. A. Fathy, A. Abu-Oqail, A. Wagih, "Improved mechanical and wear properties of hybrid Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GNPs electro-less coated Ni nanocomposite", *Arch Civ. Mech. Eng.* Vol. 44: 22135-22145, (2018).
- [15]. Z. Lu, Z. Cao, E. Hu, K. Hu, X. Hu, "Preparation and tribological properties of WS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanoparticles", *Tribology International*, vol. 130, pp.308-316, (2019).
- [16]. R. M, N. VB, Walker J, Zekonyte J, "Mechanism of action of WS<sub>2</sub> lubricant nanoadditives in high-pressure contacts", *Tribol Lett*, Vol. 52, pp 81–91, (2013).