نشریه علمی پژوهشی



علوم و فناوری **کامیوز د** http://jstc.iust.ac.ir



ساخت و بررسی خواص نانوکامپوزیت هیبریدی Al/WS2-CNT

حسين صالحي وزيري¹*، على شكوەفر²، سيد سلمان سيد افقهي³

1- دانشجوى دكترا، مهندسي مواد، خواجه نصيرالدين طوسي، تهران

2- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه امام حسین، تهران

* تېران، صندوق پستى hsalehi@mail.kntu.ac.ir ،1999143344		
چکیدہ	اطلاعات مقاله:	
در این تحقیق نانوکامپوزیت هیبریدی زمینه آلومینیوم با استفاده از نانوذرات دی سولفید تنگستن و نانولوله کربنی ساخته شد. مخلوط	دريافت: 98/08/11	
سازی پودرها در حلال استن و با استفاده از آلتراسونیک انجام شد. سپس ذرات هیبریدی و پودر آلومینیوم تحت آسیاکاری مکانیکی	پذيرش: 99/10/03	
قرارگرفتند و با استفاده از پرس گرم، پودر نهایی فشردهسازی و نانوکامپوریت هیبریدی ساخته شد. بررسی میکروساختاری نمونهها با	كليدواژگان	
استفاده از میکروسکوب نوری(OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی(FESEM) انجام شد. نتایج نشان داد فازهای تقویت	آلومينيوم	
کننده به نحو مطلوبی بر روی ذرات فلیکی آلومینیوم جذب شده اند، توزیع مناسبی از ذرات تقویت کننده در زمینه وجود دارد و تقویت	نانوكامپوزيت	
کنندهها ساختار خود را در فاز زمینه حفظ کردهاند. دانسیته نمونهها از روش ارشمیدس اندازهگیری و مشخص شد دانسیته نسبی نمونه-	هيبريد	
های هیبریدی در محدوده 96 تا 98 درصد قراردارد. جهت بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت هیبریدی آزمون میکروسختی و تست	دی سولفید تنگستن	
فشار انجام شد. هیبریدسازی اثر مثبتی بر خواص مکانیکی دارد به طوری که میکروسختی نمونههای هیبریدی 20 درصد و استحکام	نانولوله كربنى	
فشاری نانوکامپوزیت هیبریدی 17 درصد نسبت به نانوکامپوزیت Al/WS₂ افزایش نشان میدهد. آزمون سایش کاهش 50 درصدی		
ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت هیبریدی را نسبت به آلومینیوم خالص نشان داد.		

Fabrication and investigation of properties of Al / WS2-CNT hybrid nanocomposites

Hossein Salehi Vaziri^{1*}, Ali Shokuhfar¹, Seyyed Salman Seyyed Afghahi²

1-Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2-Faculty of Materials Science and Engineering, Department of Engineering, Imam Hossein University Tehran, Iran

* P.O.B. 1999143344, hsalehi@mail.kntu.ac.ir

Keywords	Abstract
Aluminum Nanocomposite Hybrid Tungsten Disulfide Carbon Nanotube	In this research, a hybrid aluminum matrix nanocomposite was made using tungsten disulfide nanoparticles and carbon nanotube. Ultrasonic was used for mixing powders in acetone. Then hybrid particles and aluminum powder were mixed by mmechanical stirrer for 2 h and ball mill for 5h. The final mixed powder were compressed by hot pressing. Microstructural analysis of the specimens was performed by Optical Microscopy (OM) and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM). The results showed that the reinforcement phases were properly adsorbed on aluminum particles, there was a good distribution of the reinforcement particles in the aluminum matrix, and nanoparticles maintained their structure. The density of samples was measured by Archimedes method and the relative density of hybrid samples was found to be 96 to 98%. Micro hardness increased with increasing carbon nanotube content up to 20% that of Al/ WS ₂ nanocomposite. Compressive strength measurements showed that hybridization increased the final compressive strength up to 17%. Wear test showed the friction coefficient of the hybrid nanocomposite decreased up to 50% compared to the pure aluminum.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید: Salehi Vaziri, H. Shokuhfar, and Seyyed Afghahi, S.S., "Fabrication and investigation of properties of Al / WS2-CNT hybrid nanocomposites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1021-1028, 2020.

1– مقدمه

کامپوزیتهای زمینه فلزی به دلیل خواص مکانیکی مطلوب دارای کاربردهای فراوانی در صنایع هوافضا و اتومبیلسازی هستند [1-3]. در این بین نانوکامپوزیتهای زمینه آلومینیوم به دلیل مزایایی از قبیل چگالی پایین، استحکام ویژه بالا و مقاومت مناسب به سایش، خستگی و خوردگی تحقیقات گستردهای را به خود اختصاص دادهاند [4]. در دو دهه اخیر تعداد زیادی از نانوذرات مانند كاربيد سيليسيم، بوريد تيتانيوم، دىسولفيد موليبدن، دى سولفید تنگستن، گرافن و نانولولههای کربنی در ساخت نانوکامپوزیتهای زمينه آلومينيوم استفاده شدهاند [5-9]. كامپوزيتهاى هيبريدى زمينه فلزى نسل دوم کامپوزیتهای زمینه فلزی هستند که در آنها از دو یا چند ماده تقويت كننده كه از لحاظ نوع، مورفولوژى و يا سايز با هم متفاوت هستند، استفاده مى شود. اين كامپوزيت ها با تركيب خواص تقويت كننده ها خواص بهتری نسبت به کامپوزیتهای با یک نوع تقویت کننده از خود نشان می دهند [10]. كامپوزیتهای هیبریدی زمینه آلومینیوم با هدف استفاده از اثر همزمان تقويت كننده ها بر استحكام، تافنس، مقاومت سايشي، كنترل خوردگی و نیز کاهش هزینهها مورد توجه قرار گرفتهاند و نانوکامپوزیتهای هيبريدى زمينه آلومينيوم با تقويتكننده ذرات سراميكى به همراه ساختارهای کربنی یا دو ذره سرامیک به صورت هم زمان اخیراً ساخته شده-اند[11-11]. برخی از ذرات تقویت کننده که به صورت همزمان در زمینه استفاده شدهاند (SiC, Al₂O₃)، (Graphite,SiC) آلومينيوم .[19-16] مىباشند (CNT,Al₂O₃), (WS₂,SiC)، (Graphite,Al₂O₃)، استفاده از نانولولههای کربنی در زمینه آلومینیوم در دو دهه اخیر مورد توجه قرارگرفته است. بطوریکه افزایش خواص مکانیکی آلومینیوم با افزودن نانولولههای کربنی تا بیش از دو برابر گزارش شده است. مکانیزم اورووان، اثر بر کاهش اندازه دانه و انتقال بار از زمینه به تقویت کننده در صورت تشکیل فصل مشترک مناسب عامل افزایش خواص مکانیکی در نانوکامپوزیتهای آلومینیوم/نانولوله کربنی است. مشکل اصلی در کاربرد نانولوله های کربنی در زمینه آلومینیوم رسیدن به توزیع مناسب و جلوگیری از تودهای شدن آنها در ساختار است. نانولولههای کربنی به دلیل نیروی واندوالس بین آنها سریعا در زمینههای کامپوزیتی تودهای میشوند[19] . در درصدهای حجمی بیش از 2 درصد نانولوله کربنی، تودهای شدن و ایجاد فصل مشترک ضعیف باعث کاهش خواص می شود [20]. توزیع مناسب نانولوله های کربنی در زمینه، ممانعت از تشکیل فاز ترد کاربید آلومینیوم، ایجاد فصل مشترک قوی بین زمینه و نانولوله کربنی و جلوگیری از تخریب ساختار نانولوله کربنی در طی فرآیند ساخت، چالشهایی است که در ساخت این نانوکامپوزیتها باید مورد توجه قرار گیرد [16]. توسعه فرآیندهای ساخت و استفاده از روشهایی مانند آسیاکاری مکانیکی به دلیل دمای پایین و توزیع بهتر ذرات در زمینه آلومینیوم و هیبرید سازی بین نانولولههای کربنی و سایر ذرات جهت غلبه بر این چالشها اخیرا مورد توجه قرار گرفتهاند. اخیرا از نانوذراتی مانند اکسید آلومینیوم و کاربید بور جهت ساخت نانوکامپوزیت هیبریدی با تقویت کننده نانولولهی کربنی با استفاده از روش آسیاکاری مکانیکی با هدف بهبود پراکندگی در زمینه آلومینیوم و افزایش خواص سایشی استفاده شده است [23-21]. نانوذرات دىسولفيد تنگستن نيز در چند سال اخير جهت افزايش خواص مكانيكي و سايشي فلزاتي مانند منيزيم [25,24]، مس [26] و آلومينيوم [28,27,9] استفاده شدهاند. رنجيفو و همكاران اثر افزوده شدن نانوذارت دیسولفید تنگستن را به آلومینیوم در دمای محیط و 200 درجه

سانتیگراد بررسی کردهاند و افزایش چگالی نسبی نانوکامپوزیت تا 99 و کاهش 50 درصدی ضریب اصطکاک در دمای اتاق و دمای 200 درجهی سانتیگراد را گزارش کردهاند [9]. نایسته و همکاران نیز فلیکهای میکرونی و شبه فولرنهای دیسولفید تنگستن را به میزان 20 درصد وزنی به زمینه آلومینیوم افزودهاند. فلیکهای دیسولفید تنگستن بهبود بیشتری در سختی و مقاومت به سایش آلومینیوم ایجاد کردهاند. کاهش ضریب اصطکاک نسب به آلومینیوم خالص برای نانوذرات شبه فولرن و فلیکهای میکرونی دی-

سولفيد تنگستن به ترتيب 20 و 30 درصد گزارش شده است[27]. نانوذرات دی سولفید تنگستن دارای خاصیت روانکاری در حالت جامد می باشند و توزیع مناسبی نسبت به نانولوله های کربنی در ساختار آلومینیوم دارند و تا حدودی خواص مکانیکی را بهبود می دهند. اثر روانکاری این مواد باعث بهبود تراكم پديرى و خواص سايشى نانوكامپوزيت مىشود [28,27,9]. به نظر مىرسد هيبريدسازى دىسولفيد تنگستن با نانولوله هاى كربنى مى-تواند منجر به توزيع بهتر نانولولهها در ساختار و افزایش خواص سایشی نانوكامپوزیت شود. تاكنون نانوكامپوزیت هیبریدی زمینه آلومینیوم با تقویت كننده نانوذرات دىسولفيد تنگستن و نانولوله كربنى ساخته نشده است. هدف از هیبریدسازی در این تحقیق رسیدن به توزیع مناسبتر نانولولههای کربنی در ساختار آلومینیوم و نیز افزایش خواص مکانیکی و سایشی آلومینیوم است. بدین منظور با استفاده از فرآیند آسیاکاری مکانیکی و پرس گرم، نانوکامپوزیت هیبریدی آلومینیوم/دیسولفید تنگستن/نانولوله کربنی با ثابت نگهداشتن میزان دی سولفید تنگستن در 1 درصد وزنی و تغییر در میزان نانولوله کربنی ساخته شد و ریز ساختار، خواص مکانیکی و سایشی نانوکامپوزیت هیبریدی مورد بررسی قرار گرفت.

2- روش تحقيق

پودر آلومینیوم استفاده شده برای ساخت نانوکامپوزیت هیبریدی در این تحقیق دارای مورفولوژی کروی با اندازه ذرات زیر 20 میکرون است. در جدول شماره 1 ترکیب شیمیایی پودر آلومینیوم مصرفی بر اساس آزمون XRF نشان داده شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی پودر آلومینیوم Table 1 Chemical composition of aluminum powder

Al	Mg	Fe	Na	Ti	Mn	Р
99	0.432	0.364	0.096	0.019	0.016	0.013

جهت سنتز نانوذرات دی سولفید تنگستن از مرجع [28] استفاده شد که توسط همین تیم تحقیقاتی توسعه داده شده است. نانوذارت دی سولفید تنگستن سنتز شده دارای اندازه ذرات زیر 50 نانومتر و مورفولوژی فلیکی و نامنظم هستند. نانولوله کربنی چند دیواره از شرکت نوترینو تهیه گردید که بر طبق اعلام سازنده دارای طول 10–30 میکرون، قطر داخلی5–10 نانومتر و قطر خارجی 10–20 نانومتر است و به عنوان تقویت کننده دوم در ساخت نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت.

جهت ساخت نمونههای نانوکامپوزیت ابتدا پودر آلومینیوم و پودرهای تقویت کننده به طور جدا گانه جهت ترشوندگی بهتر در استن به مدت 30 دقیقه تحت آلتراسونیک قرار گرفتند. سپس محلولها با هم مخلوط و کل محلول به نشريه علوم و فناوري

كاميوا

Ē

مدت دو ساعت تحت آلتراسونیک قرار گرفت. محلول به بالمیل انتقال یافت و به مدت5 ساعت تحت اتمسفر آرگون و با 250 دور بر دقیقه آسیاکاری شد. سپس محلول از بالمیل خارج و پودر خمیری شکل در آون خلاء در دمای 80 درجه سانتیگراد خشک شد. پودر کامپوزیتی حاصل جهت عملیات پرس گرم به قالب فلزی منتقل و تحت خلاء با فشار 150 مگاپاسکال و در دمای 500 درجه سانتیگراد فشردهسازی شد و قرصهایی با ارتفاع 10 میلیمتر و قطر وزنی ثابت نگه داشته شد و نانولوله کربنی در مقادیر 25.0، 5.5 و 7.0 درصد وزنی به نانوکامپوزیت اضافه شد. در جدول شماره 2 ترکیب نمونههای نانوکامپوزیت هیبریدی آلومینیوم/ دی سولفید تنگستن / نانولوله کربنی آمده

جدول2 ترکیب نمونههای کامپوزیت آلومینیوم/ دیسولفید تنگستن / نانولوله کربنی **Table 2** Composition of aluminum / tungsten disulfide / carbon nanotube hybrid nanocomposite sample

درصد وزنی CNT		درصد وزنی WS ₂	کد نمونه
	0	1	NCS
	0.25	1	HNC.25
	0.5	1	HNC.5
	0.75	1	HNC.75

چگالی نمونه ها از روش ارشمیدس بر اساس استاندارد ASTM D1217-15 اندازه گیری شد. وزن هر نمونه یکبار در هوا و یکبار در داخل آب مقطر با ترازوی با دقت ده هزارم گرم اندازه گیری شده و با استفاده از رابطهی (1) چگالی نمونهها محاسبه شد.

$$D_{\rm A} = \frac{D_{\rm w} W_{\rm a}}{W_{\rm a} - W_{\rm w}} \tag{1}$$
 رابطه (1)

در این رابطه Wa و Ww به ترتیب وزن قرص در هوا و در آب است. همچنین Dw چگالی آب در دمای مورد استفاده است. جهت محاسبه دانسیته تئوری نمونهها از رابطهی (2) استفاده شد و چگالی نسبی از رابطه (3) بدست آمد.

 $D_{ct} = v_{Al}D_{Al} + v_{WS2}D_{WS2} + v_{CNT}D_{CNT}$ (2) (2)

$$D_{\rm R} = \frac{D_{\rm A}}{D_{\rm ct}} \tag{3}$$

میکروسکوپ نوری جهت بررسی میکرو ساختار با بزرگنمایی حداکثری 1000 استفاده شد. بهمنظور بررسی مورفولوژی نانوذرات (نانولولهها و دی-سولفید تنگستن) در ریز ساختار نانوکامپوزیت از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی(FESEM) استفاده و تصاویری در مقیاس تفکیکی 5 میکرون تهیه شد. اندازه گیری سختی نمونهها بر اساس میکرو ویکرز با نیروی ASTM E384 میکرون تهیه شد. اندازه گیری سختی نمونهها بر اساس میکرو ویکرز با نیروی اعمالی 50 گرم، مدت اعمال 10 ثانیه و براساس استاندارد -ASTM E384 محتلف سختی گرفته شد و نهایتا سختی متوسط گزارش شد. با استفاده از وایرکات از هر قرص تولیدی سه نمونه به قطر 4 و ارتفاع 8 میلیمتر جهت بر اساس استاندارد -ASTM E90 با دستگاه اینسترون با بار اعمالی 15 نیوتن و سرعت 0.4 میلیمتر بر دقیقه مورد سنج قرار گرفت.

قرصهای تهیه شده از فرآیند فشردهسازی جهت انجام تست سایش مورد استفاده قرار گرفت. شرایط انجام تست سایش به شرح زیر انتخاب شد. نمونه به عنوان دیسک قرار گرفت و تست سایش از روش گلوله بر روی دیسک(Ball On Dick) با گلوله از جنس فولاد انجام شد. سرعت 100 دور بر دقیقه، زمان انجام 90 دقیقه، مسافت 1000 متر و نیروی اعمالی 10 نیوتن، بر اساس استانداردASTM G99 در نظر گرفته شد.

3- نتايج و بحث

جهت اختلاط بهتر پودر زمینه و تقویت کننده باید مورفولوژی پودرها به هم نزدیک شود. برای این منظور پودرها تحت آسیاکاری مکانیکی قرار گرفتند. کاهش اختلاف نسبت منظر پودر زمینه و تقویت کننده باعث نزدیک تر شدن مورفولوژی پودرها میشود و توزیع بهتری اتفاق میافتد. در فرآیند آسیاکاری گلولهها به صورت یک میکرو غلطک عمل کرده و ذرات نرم آلومینیوم تحت نورد قرار می گیرند و به شکل صفحهای تغییر مورفولوژی میدهند[19]. نانوذرات دیسولفید تنگستن ساختار صفحهای دارند و نانولولههای کربنی نانوساختاری تک بعدی هستند. صفحهایی شدن پودر آلومینیوم به نزدیک تر شدن مورفولوژی ذرات و توزیع بهتر کمک مینماید. در شکل 1 تصویر شدن مورفولوژی زوات و توزیع بهتر کمک مینماید. در شکل 1 تصویر نشان داده شده است. مورفولوژی پودر آلومینیوم بعد از 5 ساعت آسیاکاری از کروی به صفحهای تغییر کرده است.

در شکل 2 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر نانوکامپوزیت هیبریدی نشان داده شده است. چنانچه از تصویر مشخص است سطح پودرهای آلومینیوم توسط تقویت کنندهها پوشیده شده است. ذرات دی-سولفید تنگستن و نانولوله کربنی در کنار هم و بر روی سطح ذرات آلومینیوم حضور دارند و این ذرات به شکل مناسبی بر روی پودرهای آلومینیوم جذب شده و ساختار خود را حفظ کردهاند. در این تصویر به وضوح نانولولههای مجزا که بر روی ذرات آلومینیوم حضور دارند قابل مشاهده است. این موضوع نشان دهنده اثر هیبریدسازی بر توزیع مناسب نانولولهها و عملکرد مناسب فرآیند مخلوط سازی پودرها است. فرآیند آسیاکاری ساختار پودرهای تقویت کننده مرا می تواند تغییر دهد که جهت حفظ ساختار نانوذرات خصوصا نانولولههای کربنی علاوه بر زمان آسیاکاری مناسب (5 ساعت) شرایط آسیاکاری تر استفاده شد تا ساختار ذرات کمتر در طول فرآیند دچار آسیب شود[16].



Fig. 1 FESEM image of aluminum powder after 5 h ball mill شکل1 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر آلومینیوم بعد از 5 ساعت آسیاکاری



Fig. 2 FESEM image of hybrid nanocomposite powder شکل 2 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر نانوکامپوزیت هیبریدی

بررسی ریزساختاری نمونهها با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام شد. ريزساختار نمونهی هيبريدی با 50 درصد وزنی نانولوله کربنی در شکل 3 نشان داده شده است. در این تصویر شکل دانهها کشیده و به شکل صفحهای است. که با توجه به زمان آسیاکاری و ساختار لایهای پودر قبل از عملیات پرس گرم قابل توجیه است در واقع ذرات فلیکی آلومینیوم برروی هم فشرده شده و دانه بندی را بوجود آوردهاند. در برخی از مرزهای دانه به خصوص در نواحی که چندین لایه به هم میرسند، حفرهها یا تجمعاتی از مواد تقویت کننده وجود دارد. تجمع ذرات تقویت کننده در مرزدانهها باعث جلوگیری از حرکت مرزدانهها و ظریفتر شدن آنها می شود علاوهبراین زمان طولانی آسیاکاری باعث ایجاد تنش پسماند در ذرات شده و انرژی ذخیره شده در ذره را افزایش میدهد که در حین فرآیند زینتر باعث کوچکتر شدن ذرات می-شود. با بررسی ساختار میکروسکوپی سایر نمونهها مشخص شد با افزایش درصد تقویت کننده CNT در نانوکامپوزیت هیبریدی نقاط تجمع نانوذرات افزایش پیدا کرده و همچنین مرزهای دانه بیشتر و لایهها باریکتر می شوند. تجمع مواد تقویت کننده در مرزهای دانه، مانع از حرکت مرز در طول فرآیند زینترینگ و کاهش ضخامت لایهها می شود. کاهش اندازه دانهها با وجود دی-سولفید تنگستن و نانولوله کربنی در زمینه آلومینیوم توسط سایر محققین نیز گزارش شده است که ناشی از توانایی و قابلیت این ذرات در جلوگیری از حركت مرزدانهها در فرآيند زينتر و كاهش اندازه دانهها است[29,28].



Fig. 3 Optical micrograph of HNC.5 sample in 1000x شكل 3 تصوير ميكروسكوپ نورى نمونه HNC.5 در بزرگنمايى 1000 برابر

شكل4 تصوير ميكروسكوپ الكتروني روبشي از سطح پوليش شده نمونه هيبريدى با 0.5 درصد وزنى نانولوله كربنى را نشان مىدهد. اين شكل نشان دهنده حضور نانولوله کربنی و دی سولفید تنگستن در کنار یکدیگر در ساختار نمونه بالک فشرده شده است. چنانچه در این تصویر مشخص است مورفولوژی و اندازه فازهای تقویت کننده در محدوده نانومتری حفظ شده است و حضور هم زمان هر دو تقویت کننده در ساختار دیده می شود. ذرات به دلیل جرم اتمی مختلف در تصویر میکروسکوپ الکترونی با رنگ روشن(فاز سنگین تر) و تیره (فازهای سبک تر) دیده می شوند. در این تصویر ذرات دی-سولفید تنگستن به وضوح قابل مشاهده است و البته نانولولههای کربن نیز به صورت بیرون زده از ساختار قابل مشاهده هستند. بهطور کلی با وجود ذرات با اندازه كمتر از 200 نانومتر اتصال قابل قبولي بين زمينه و تقويت كننده ایجاد می شود که باعث افزایش خواص مکانیکی خواهد شد. علاوه براین با توزيع مناسب ذرات در ساختار به دليل سطح زياد نانوذرات ميزان فصل مشترک در ساختار به شدت افزایش خواهد یافت که انتقال بهتر بار از زمینه به تقويت كننده را باعث خواهد شد [30]. عدم تخريب ساختار ذرات تقويت کننده در ساختار نهایی خصوصا در مورد نانولولههای کربنی بسیار مهم است زیرا خواص مطلوب نانوذرات در صورتی می تواند در کامیوزیتسازی موثر واقع شود که ساختار نهایی ذرات در زمینه در طول فرآیند ساخت حفظ شود. در شکل 4 می توان نانولوله کربنی و نانوذرات دی سولفید تنگستن را در ساختار مشاهده کرد که مناطق تجمع ذرات(آگلومره ها) نیز در محدوده زیر 300 نانومتر قرار دارند. با توجه به شکل 4 و همچنین اشکال 2 و 3 می توان گفت افزایش میزان نانولوله کربنی در ساختار اگرچه باعث افزایش نقاط تجمع ذرات خواهد شد. ولی کوچک بودن مناطق تجمع و توزیع همگن هر دو تقویت کننده، مناسب بودن پروسه ساخت را تایید مینماید.

- چگالی نسبی

تغییرات چگالی نسبی نانوکامپوزیت بر حسب میزان نانولوله کربنی در شکل 5 نشان داده شده است. دانسیته نسبی نمونههای هیبریدی در محدوده 96 تا98ودرصد قرار دارد، دانسیته نسبی نمونههای هیبریدی از نمونه 1 درصد وزنی دیسولفید تنگستن (99 درصد) پایینتر است و اثر افزایش درصد نانولوله کربنی بر این نمونهها کاهش در میزان دانسیته نسبی است. توزیع مناسب ذرات در زمینه آلومینیوم و جذب مناسب این ذرات بر روی پودر آلومینیوم میتواند تاثیر به سزایی در افزایش دانسیته داشته باشد. بهطور کلی در نانوکامپوزیتها فشرده سازی پودرهای حاوی نانوذرات مشکل تر از فشرده



Fig. 4 FESEM micrographs of the HNC.5 sample MNC.5 شكل 4 تصوير ميكروسكوپ الكتروني روبشي از سطح نمونه

1024

شریه علوم و فناوری ک**ا میو زیت**

سازی ذرات خالص پودر میکرونی فلز پایه است و فشارهای بالاتری نسبت به

نمونه خالص نیاز است تا به دانسیته نسبی بالا رسید. دلیل این موضوع

پتانسیل بالای انعطاف پذیری نانوذرات و نیز سطح زیادی است که در ساختار



Fig. 5 Variation of relative density with carbon nanotube content شکل 5 تغییرات دانسیته نسبی نمونههای نانوکامپوزیت هیبریدی بر حسب میزان غلظت نانولوله کربنی

- سختی

سختی نمونههای هیبریدی با استفاده از دستگاه میکرو سختی اندازه گیری شد. شکل 6 سختی نانوکامپوزیتهای هیبریدی را در مقیاس میکروویکرز بر حسب میزان نانولوله کربنی نشان میدهد. سختی نمونه 1 درصد وزنی دی سولفيد تنگستن 10 ميكرو ويكرز بيشتر از نمونه خالص است. و سختي نمونه های هیبریدی با افزایش میزان نانولوله کربنی افزایش یافته است و در بازه 80 تا 88 ميكروويكرز قراردارد. افزودن نانوذرات عموما باعث افزايش سختى در نانوکامپوزیت می شود. عوامل مختلفی در ایجاد سختی در نانوکامپوزیت موثر هستند که شامل اثر گذاری نانوذارت بر مکانیزمهای استحکام دهی مثل مكانيزم اورووان، هال-پچ و دانسيته نابجاييها است. نانوذرات در داخل ذرات زمینه و یا در مرزدانهها قرار می گیرند تاثیر گذار خواهند بود. توزیع مناسب نانوذرات در زمینه باعث کاهش فاصله بین ذرهای در ساختار میشود که مانع حرکت نابجاییها است و حرکت نابجاییها را در ساختار کند مینماید. نانوذرات بر مرزدانه ها نیز اثر گذار هستند. و مانع از حرکت آنها شده و بر نفوذ مرزدانهای نیز تاثیر می گذارند. بنابراین حضور نانوذرات باعث ریزتر شدن دانه-ها و همچنین جلوگیری از حرکت مرز دانهها در اثر تغییر شکل می شود. سطح نانوذرات بسیار فعال است و سطح زیادی را ایجاد مینمایند. تشکیل فازهای سخت در زمینه مانند کاربید آلومینیوم نیز ممکن است در افزایش سختى موثر باشد[28, 29, 31]. اگر چه كاهش دانسيته نسبى اثر مستقيمي بر كاهش سختي دارد ولي در تحقيقات مختلفي كه انجام شده است با وجود كاهش دانسيته نسبى با حضور نانوذرات سختى افزايش يافته است. اين روند می تواند حاصل غلبه مکانیزمهای افزایش سختی در نمونه در مقابل اثر کاهش دانسیته نسبی باشد[28-30]. مطابق شکل6 روند افزایش سختی در نانوكاميوزيت هيبريدى با افزايش ميزان نانولوله كربنى تطابق دارد. توزيع مناسب نانولولههای کربنی در ساختار از افت شدید دانسیته نسبی جلوگیری و اثر مثبتی بر قفل شدن نابجاییها و جلوگیری از حرکت مرز دانهها دارد که نهایتا باعث افزایش سختی در نانوکامپوزیت خواهد شد.

به وجود میآید و منجر به افزایش اصطکاک بین دانهای میشود. حفرات در حین عملیات فشردهسازی با حرارت دهی (پرس گرم) در داخل و بین دانهها ایجاد می شوند. تغییر آرایش ذرات، تغییر شکل موضعی و تغییر شکل بالک به ترتیب در فرآیند فشردهسازی با افزایش دما اتفاق میافتد. همچنین عدم انطباق ضريب انبساط حرارتى ذرات تقويت كننده و زمينه نيز بر ميزان تراکمپذیری موثر هستند [29]. مکانیزم اصلی در تراکمپذیری در حین عمليات زينترينگ انجام نفوذ بين ذرات آلومينيوم است كه وجود نانوذرات این فرآیند را کند می کند و با افزایش درصد وزنی نانوذرات و ایجاد کلاسترها و تودهها كاهش زينتر پذيري و افزايش حفرات بين دانهاي اتفاق ميافتد[31]. در بررسی اثر نانوذارت بر دانسیته نسبی افزایش دانسیته نسبی خصوصا در مقادیر کم تقویت کننده گزارش شده است. دلیل این مهم پرشدن حفرات بین ذرات پودر زمینه و کوچک بودن ذرات و اثر ناچیز بر کاهش نفوذ بین دانهای ذکر شده است [31,28,9]. در مورد ذرات با خواص روانکار حالت جامد نیز پژوهشهای مختلف افزایش دانسیته با حضور نانوذارتی چون دی سولفید تنگستن را نشان داده است که به دلیل روانکاری بین ذرات و کاهش اصطكاك بين ذرهايي است [28,9,8]. در تحقيق حاضر اقزودن نانوذرات دي سولفيد تنگستن به پودر آلومينيوم باعث افزايش دانسيته تا 99 درصد در 1 درصد وزنی شده است این افزایش در دانسیته با نتایج سایر محققین مطابقت دارد. اگرچه میزان تقویت کننده که حداکثر دانسیته در آن اتفاق افتاده است متفاوت می باشد که ناشی از تفاوت در روش ساخت و مورفولوژی ذره است [31,28,9,8]. دلیل افزایش دانسیته در 1 درصد وزنی دیسولفید تنگستن در این نانوکامپوزیت جذب خوب نانوذرات دیسولفید تنگستن بر روی فلیک-های آلومینیوم و توزیع مناسب ذرات تقویت کننده است (چنانچه در بررسی میکروساختاری مشخص شد) که منجر به پر شدن حفرات بین فلیکها می-شود. علاوهبراین اثر روانکاری ذرات دیسولفید تنگستن نیز بر کاهش اصطكاك بين فليكهاى آلومينيوم و فشرده شدن بيشتر آنها در فرآيند پرس گرم کمک میکند. با توجه به میزان کم تقویت کننده(1 درصد وزنی) عملا تاثیر منفی بر فرآیند زینترینگ نیز ناچیز است. با افزودن نانوتیوب به عنوان فاز تقویت کننده دوم به ساختار کاهش دانسیته نسبی اتفاق افتاده است. که دلایل ذکر شده در بالا، خصوصا ایجاد تودههای نانولوله کربنی عامل اصلی ایجاد حفرات بین دانهای در زمینه آلومینیوم و کاهش دانسیته نسبی است. افزایش حجم کل تقویت کننده ها در ساختار با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی، تودهای شدن را افزایش می دهد که اثر منفی در فرآیند زینترینگ دارد. عدم توزیع یکنواخت(1 به 1) دو تقویت کننده نسبت به یکدیگر در زمینه نانوکامپوزیت نیز می تواند اثر روانکاری بین ذرات را کاهش دهد. این عوامل می تواند دلیل افت دانسیته نسبی در نمونههای هیبریدی باشد.



Fig. 6 Variation of Micro-hardness with carbon nanotube content شكل 6 تغييرات ميكروسختى نانوكامپوزيت هيبريدى بر حسب ميزان نانولوله كربنى

- آزمون فشار

در شکل 7 نمودار استحکام فشاری نمونهها بر حسب میزان نانولوله کربنی نشان داده شده است. نمونه نانوکامپوزیت با 1 درصد وزنی دی سولفید تنگستن در طول آزمایش فشار رفتاری شبیه به فلز آلومینیوم دارد. این درحالی است که نمونههای هیبریدی تماما به صورت ترد و در راستای طولی تحت فشار با ترک مورب شکستند. چنانچه از شکل7 مشخص است با افزایش غلظت نانولوله کربنی در نمونههای هیبریدی استحکام فشاری افزایش مییابد و به بیش از 400 مگاپاسکال میرسد. به حداقل چهار دلیل استحکام مكانيكى توسط نانوذرات مىتواند افزايش يابد. اولين دليل كندى حركت نابجاییها با حضور ذرات تقویت کننده در ساختار به دلیل میدان تنشی ایجاد شده حول نانوذرات است. دومین دلیل افزایش دانسیته نابجاییها به دلیل حضور نانوذرات است که به واسطه عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی و یا ایجاد حلقههای اوروان به وجود میآید. اثر نانوذرات بر کاهش اندازه دانهها سومین دلیل برای افزایش استحکام نانوذرات است و قفل شدن ترکها توسط نانوذرات چهارمین دلیل ذکر شده در منابع مختلف برای استحکامدهی نانوذرات در زمینههای فلزی است. فصل مشترک ذرات تقویت کننده و زمینه عامل انتقال بار از زمينه به تقويت كننده و كنترل كننده تغييرات استحكام در نانوكامپوزيتها است. توزيع غير يكنواخت نانوذرات مىتواند منجر به ايجاد تودهای از نانوذرات در ساختار شود که به شدت خواص مکانیکی را تحت تاثیر قرار میدهد. زیرا افزایش تودهای شدن باعث ایجاد مناطق تمرکز تنش در ساختار شده، حفرات را افزایش می دهد و جدایش در ساختار و تشکیل ترک را تسريع مى نمايد[4,28,29]. ميزان اثرگذارى نانولوله كربنى بر خواص مکانیکی کامپوزیتهای زمینه آلومینیوم به سه عامل نحوه توزیع، کسر حجمي و استحكام فصل مشترك آلومينيوم و نانولوله كربني بستگي دارد [31]. با توجه به شکل 7 در نمونه با میزان 1 درصد وزنی دیسولفید تنگستن استحکام فشاری حدود 350 مگاپاسکال است که با افزودن نانولوله کربنی به ساختار این مقدار بیش از 17 درصد افزایش یافته است. چنانچه در نمودار مشخص است در مقادیر کم نانولوله کربنی(تا ٪0.25) استحکام فشاری تغییر چندانی نداشته است که نشان دهنده اثر کم نانولولههای کربنی بر توقف حرکت نابجاییها در این مقادیر است برخی از محققین ادعا کردهاند که نانولولههای کربنی توانایی جلوگیری از حرکت نابجاییها را در مقادیر



Fig. 7 Variation of Compressive strength with carbon nanotube content $\mathbf{\hat{m}}$ $\mathbf{\hat{T}}$ $\mathbf{\hat{T}$ $\mathbf{\hat{T}}$ $\mathbf{\hat{T}}$ $\mathbf{\hat{T}}$ $\mathbf{\hat{T}}$ $\mathbf{\hat{T}}$ $\mathbf{\hat{$

پایین ندارند که البته مطالعات بیشتر در این زمینه توصیه شده است[10]. در مقادیر بالاتر حضور نانولوله کربنی در ساختار باعث کندی حرکت نابجاییها از طریق قفل شدن آنها توسط این نانوذرات و نیز کاهش فاصله بین ذرهای و ایجاد مانع در مسیر آنها شده است. علاوه بر این تجمع نانولولهها در مرزها افزایش یافته است که این پدیده باعث افزایش استحکام از طریق کاهش اندازه دانهها و ترد شدن نانوکامپوزیت هیبریدی در مقایسه با نمونه نانوکامپوزیت آلومینیوم/ دی سولفید تنگستن به دلیل افزایش مناطق تمرکز تنش و مستعد جهت جدایش و ایجاد ترک شده است.

افزایش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت هیبریدی با افزایش درصد نانولوله کربنی در ساختار علیرغم افزایش کلی حجم تقویتکنندهها اتفاق افتاده است که نشان دهنده توزیع مناسب نانوذرات و انتقال مناسب بار از زمینه به تقویت کننده است.

- آزمون سايش

آزمون سایش جهت بررسی خواص سایشی نانوکامپوزیت هیبریدی انجام شد و ضریب اصطکاک و کاهش وزن ناشی از سایش اندازه گیری شد. نمودارهای ضریب اصطکاک و کاهش وزن برحسب میزان نانولوله کربنی محتوی در شکل 8 و 9 نشان داده شده است. بر اساس شکل 8 ضریب اصطکاک با افزایش میزان نانولوله کربنی در نمونه ها کاهش یافته است و ضریب اصطکاک همه نمونهها كمتر از نمونه خالص و نمونه با 1 درصد وزنی دیسولفید تنگستن است. با توجه به نمودار شکل 8 ضریب اصطکاک نمونه با 1 درصد وزنی دیسولفید تنگستن در محدوده 0.65 قرار گرفته است. کاهش ضریب اصطکاک در نمونههای هیبریدی نسبت به نمونه خالص، به دلیل وجود 1 درصد وزنی دیسولفید تنگستن در نمونهها به دلیل اثر روانکاری این ماده است. افزایش نانولوله کربنی در نمونهها اثر مثبتی بر خواص سایشی دارد که ناشی از افزایش سختی نمونهها به دلیل حضور نانولولههای کربنی است. در شکل 9 نمودار کاهش وزن در اثر سایش بر حسب درصد وزنی نانولولههای كربنى نشان داده شده است. با افزايش ميزان نانولوله كربنى، ميزان كاهش وزن نمونهها نیز کاهش می یابد که نشان دهنده افزایش مقاومت سایشی نمونهها است و نتایج با تغییرات ضریب اصطکاک تطابق دارد. با افزایش سختی نمونههای هیبریدی مقاومت سایشی نمونهها نیز افزایش یافته است. حجم کاهش یافته(\emptyset) و سختی نمونه(H) بر اساس رابطه4 به هم مرتبط می شوند. که در این رابطه F بار اعمالی، V سرعت سایش و K یک عدد ثابت

$$\phi = K * \frac{F * V}{H} \tag{4}$$

علاوه بر این آچارد رابطه5 را برای رابطه نرخ سایش و ضریب اصطکاک پیشنهاد داده است که در آن W نرخ سایش، F بار اعمالی، D مسافت سایش، H سختی و K ضریب اصطکاک است.

$$W = K * \frac{F * D}{H}$$
(5) (5)

بر اساس روابط (4) و (5)، ضریب اصطکاک و کاهش وزن رابطه معکوس با سختی دارند. این روند در نمونههای هیبریدی نیز دیده میشود. البته همیشه این گونه نیست چون سختی تنها عامل تعیین کننده میزان مقاومت سایشی نیست. ضعف پیوند بین زمینه و تقویت کننده و امکان تشکیل ذرات سخت ساینده در حین سایش، میتوانند باعث افزایش نرخ سایش شده و مقاومت به سایش را کاهش دهند. بنابراین علاوهبر سختی میتوان پراکندگی مناسب نانولولههای کربنی در زمینه، چنانچه از بررسی های میکروساختاری مشخص شد، و پیوند مناسب بین زمینه و تقویت کننده را از عوامل اثر گذار بر کاهش ضریب اصطکاک در نظر گرفت.



Fig. 8 Variation of Friction Coefficient with carbon nanotube content شکل 8 تغیرات ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت هیبریدی بر اساس میزان نانولوله کربنی



Fig. 9 Variation of Weight Loss with carbon nanotube content **شکل** 9 تغیرات استحکام فشاری نانوکامپوزیت هیبریدی بر اساس میزان نانولوله کربنی

با مقایسه بین خواص سایشی گزارش شده برای نانوکامپوزیت هیبریدی Al/Al₂O₃/CNT و Al/B₄C/CNT با نانوکامپوزیت هیبریدی ساخته شده در این تحقیق(Al/WS₂/CNT) مشخص شد این نانوکامپوزیت در 1 درصد وزنی دیسولفید تنگستن و 0.75 درصد وزنی نانولوله کربنی دارای عملکرد مشابه سایشی با دو هیبرید دیگر در مقادیر ثابت 5 درصد وزنی اکسید آلومینیوم و کاربید بور و 2 درصد وزنی نانولوله کربنی هستند که مصرف کمتر نانوذرات را در این نانوکامپوزیت نشان میدهد. وجود ذرات سخت کاربید بور و اکسید آلومینیوم عامل اصلی در افزایش مقاومت سایشی آلومینیوم در هیبرید این مواد و نانولوله های کربنی است در حالیکه عمده افزایش مقاومت سایش در نانوکامپوزیت هیبریدی ساخته شده در این تحقیق به دلیل خواص روانکاری ذرات دیسولفید تنگستن میباشد [23,22].

4- نتايج

در این تحقیق نانوکامپوزیت هیبریدی آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات دی-سولفید تنگستن و نانولوله کربنی ساخته شد و خواص مکانیکی و ریز ساختار آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

1- فرآیند بکار گرفته شده در این تحقیق جهت ساخت نانوکامپوزیت هیبریدی روشی مناسب است و باعث توزیع مطلوب ذرات دیسولفید تنگستن و نانولوله کربنی در ساختار می شود.

2- آسیاکاری مکانیکی "تر" باعث نزدیک تر شدن مورفولوژی پودرهای زمینه و تقویت کننده به یکدیگر شده و جذب بهتر ذرات تقویت کننده را به دنبال خواهد داشت و باعث حفظ ساختار اولیه ذرات تقویت کننده در ساختار نهایی نانوکامپوزیت خواهد شد.

3- دانسیته نسبی نانوکامپوزیت هیبریدی با افزایش نانولوله کربنی در ساختار روندی نزولی دارد که ناشی از اثر ایجاد کلاسترها و مناطق تودهای نانولوله کربنی است که در طی فرآیند زینترینگ حفرات بین دانهای را افزایش داده است.

4- سختی نمونه های ساخته شده با افزایش نانولوله کربنی در ساختار افزایش مییابد که به دلیل قفل شدن و کند شدن حرکت نابجاییها، افزایش دانسیته نابجایی ها و مکانیزم استحکام دهی اورووان است.

5- استحکام فشاری نانوکامپوزیت هیبریدی با افزایش مقدار نانولوله کربنی در ساختار افزایش یافته است که مکانیزم اصلی کاهش اندازه دانهها و اثر هال-یچ و جلوگیری از رشد ترک توسط نانوذرات است.

6- مقاومت سایشی نانوکامپوزیت هیبریدی به دلیل وجود دیسولفید تنگستن به عنوان روانکار جامد در ساختار و افزایش سختی ناشی از وجود نانولولههای کربنی بالا است و ضریب اصطکاک در نمونه با 0.75 درصد نانولوله کربنی تا 50 درصد نسبت به نمونه خالص کاهش یافته است.

7- نانوذرات دیسولفید تنگستن و نانولوله کربنی در درصدهای کم (تا ادرصد وزنی) به دلیل توزیع مناسب و کاهش تودهای شدن باعث افزایش خواص مکانیکی در زمینه آلومینیوم میشوند.

5- مراجع

[1] Yılmaz, O. and Buytoz, S. "Abrasive wear of Al2O3-reinforced aluminium-based MMCs", Composites Science and Technology, vol. 61, pp. 2381-2392, 2001.

Nanotubes and Carbon Nanostructures in press DOI: 10.1080/1536383X.2019.1612882, 2019.

[23] Gowda, A. C. Girish, D. P. Santhosh, N. Kumar, A. "Study of Wear Characteristics of Aluminium/B4C/CNT Hybrid Composites under the Influence of Controlled Factors" Nano Trends: A Journal of Nanotechnology and Its Applications, Vol 18(2), pp 21-32, 2016.

[24] Huang, S.J. Ho, C.H. Feldman, Y. and Tenne, R. "Advanced AZ31 Mg alloy composites reinforced by WS2 nanotubes", Journal of Alloys and Compounds, vol. 654, pp. 15-22, 2016.

[25] Huang, S.J. Lin, C.C. Huang, J.Y. and Tenne, R. "Mechanical behavior enhancement of AZ31/WS2 and AZ61/WS2 magnesium metal matrix nanocomposites", Advances in Mechanical Engineering, vol. 10(2), pp. 1-14, 2018.

[26] Wang, Q. Chen, M. Shan, Z. Sui, C. Zhang, L. Zhu, S. et al., "Comparative study of mechanical and wear behavior of Cu/WS2 composites fabricated by spark plasma sintering and hot pressing", Journal of Materials Science & Technology, vol. 33, pp. 1416-1423, 2017.

[27] Niste, V. B. Ratoi, M. Tanaka, H. Xu, F. Zhu, Y. and Sugimura, J. "Self-lubricating Al-WS2 composites for efficient and greener tribological parts", Scientific reports, vol. 7, p. 14665, 2017.

[28] Vaziri, H. S. Shokuhfar, A. and Afghahi S. S.S. "Investigation of mechanical and tribological properties of aluminum reinforced with tungsten disulfide (WS2) nanoparticles", Material. Research Express in press https://doi.org/10.1088/2053-1591/aafa00, 2018.

[29] Cavaliere, P. Sadeghi, B. and Shabani A. "Carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites produced by spark plasma sintering", Journal of Materials Science, vol 52, pp 8618–8629, 2017.

[30] Shakeri, H.R. Wang, Z. "Effect of alternative aging process on the fracture and interfacial properties of particulate Al2O3–reinforced Al (6061) metal matrix composite", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 33A, pp. 1699-1713, 2002.

[31] Yarahmadi, A. Rajabi, M. Talafi Noghani, M. Taghiabadi, R. "Synthesis of Aluminum- CNTs Composites Using Double-Pressing Double-Sintering Method (DPDS)", Nanostructure, vol 9(1), pp 94-102, 2019.

[2] Feng, Y. Geng, L. Zheng, P. Zheng, Z. and Wang, G. "Fabrication and characteristic of Al-based hybrid composite reinforced with tungsten oxide particle and aluminum borate whisker by squeeze casting", Materials & Design, vol. 29, pp. 2023-2026, 2008.

[3] Hu, Q. Luo, P.and Yan, Y. "Microstructures, densification and mechanical properties of TiC–Al2O3–Al composite by field-activated combustion synthesis", Materials Science and Engineering: A, vol. 486, pp. 215-221, 2008.

[4] Alipour, M. and Eslami-Farsani, R., "Investigation of the microstructure and hardness of cast AA7068 nanocomposite reinforced with SiCnanoparticles", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 461-468, 2019.

[5] Kumar, S. Chakraborty, M. Sarma, V. S. and Murty, B. "Tensile and wear behaviour of in situ Al–7Si/TiB2 particulate composites", Wear, vol. 2,65pp. 134-142, 2008.

[6] Gopalakrishnan, S. and Murugan, N. "Production and wear characterisation of AA 6061 matrix titanium carbide particulate reinforced composite by enhanced stir casting method", Composites Part B: Engineering, vol. 43, pp. 302-308, 20.12

[7] Wozniak, J. Kostecki, M. Cygan, T. Buczek, M. and Olszyna, A. "Self-lubricating aluminium matrix composites reinforced with 2D crystals", Composites Part B: Engineering, vol. 111, pp. 1-9, 2017.

[8] Jirang, C. and Roven, H. J. "Recycling of automotive aluminum", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 20, pp. 2057-2063, 2010.

[9] Rengifo, S. Zhang, C. Harimkar, S. Boesl, B. and Agarwal, A. "Effect of WS 2 Addition on Tribological Behavior of Aluminum at Room and Elevated Temperatures", Tribology Letters, vol. 65, p. 76, 2017.

[10] Rajmohan, T. Palanikumar, K. and Ranganathan, S. "Evaluation of mechanical and wear properties of hybrid aluminium matrix composites", Transactions of nonferrous metals society of China, vol. 23, pp. 2509-2517, 2013.

[11] Prasad, S. V. and Mecklenburg, K. R. "Self-lubricating aluminum metal-matrix composites", Google Patents, 1996.

[12] Prasad, R. Asthan, A. "Aluminum metal-matrix composites for automotive applications tribological considerations", Tribology Letters, vol17, pp 445–453, 2006.

[13] Jha, A. K. Dan, T. K. Prasad, S. V, Rohatgi, P. K. "Aluminum alloy solid lubricant talc particle composites", Journal of Material Science, vol 21, pp 3681-3685, 1986.

[14] Rajmohan, T. Palanikumar, K. "Modeling and analysis of Performance in drilling hybrid composites", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 64, pp 1249–1261, 2013.
[15] Johny, S. Venkatesan, j. K. Kuppan, P. Ramanujam, R. "Hybrid Aluminium Metal Matrix Composite Reinforced with SiC and TiB2", Procedia Engineering, vol 97, pp 1018 – 1026, 2014.

[16] Khani, M. Ezatpour, H. R. Ebrahimi, Gh. R. "Mechanical and microstructure properties of Al/CNT-Al2O3 hybrid nanocomposite produced by accumulative roll bonding process", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 12, pp. 56-64, 2018.

[17] Bodunrin, M. O. Alaneme, K. K. and Chown, L. H. "Aluminum matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics", Journal of materials research and technology, vol. 4, pp. 434-445, 2015.

[18] Muley, A. V. Aravindan, S. and Singh, I. "Nano and hybrid aluminum based metal matrix composites: an overview", Manufacturing Review, vol. 2, p. 15, 2015.

[19] Rikhtegar, F. Shabestari, S. and Saghafian, H. "Investigation of microstructure and mechanical properties of Al2024-CNT nanocomposite produced by flake powder metallurgy process", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 91-100, 2017.

[20] Bakshi, S. R. Lahiri, D. and Agarwal, A. "Carbon nanotube reinforced metal matrix composites-a review", International materials reviews, vol. 55, pp. 41-64, 2010.

[21] Jam, j. m. Akbari, A. Khakbiz, M. "Fabrication Al6061/CNT Nanocomposite and Investigation of Wear Property" In Persian, journal of advanced processes in material engineering, Vol 3, pp29-40, 2009.

[22] Ahmed, Sh. Zayed, B. M. Kamel, T. A. Osman, O. A. Elkady, A. Shady, A. (2019) "Experimental study of tribological and mechanical properties of aluminum matrix reinforced by Al2O3/CNTs" Fullerenes,