

## Investigating the Wear Behavior of Nanocomposite Based on Cu-5Zn Alloy Reinforced with Carbon Nanotubes

Research Article

Mohammad Alipour<sup>1</sup> 

DOI: [10.22067/jmme.2023.80885.1103](https://doi.org/10.22067/jmme.2023.80885.1103)

### 1- Introduction

Considering the extraordinary mechanical properties of carbon nanotubes and its lubrication ability, a number of research works have been carried out to investigate the relative properties of copper composites with carbon material reinforcement. Guiderdoni and his colleagues have studied the hardness, friction and wear of copper nanocomposites with reinforcement. Investigated carbon nanotube with double wall. It has been observed that the hardness of nanocomposites is 50% higher than pure copper. A lower friction coefficient at a lower wear rate was obtained for nanocomposites by 4 and 20 times, respectively, compared to pure copper. The carbon materials formed during the tests were mixed with mechanical layers, which reduced the wear rate and friction coefficient. Lin and his colleagues investigated the wear properties of copper composites with carbon nanotube reinforcement by conducting wear tests. Composites with 10%-15% weight percentage of carbon nanotubes can reduce wear rate and friction coefficient. After adding carbon nanotube to the composite, the amount of plastic deformation decreased during the wear test. This research investigated the wear behavior of Cu-Zn/CNT nanocomposites and the copper-zinc nanocomposite was made by powder metallurgy and forging process. Wear test based on pin on disc method based on G99 standard, friction and wear parameters under different loads and also different sliding speed have been studied and discussed. The reason for using Cu-5Zn alloy is that this alloy is known as gilded brass (with 5% zinc). Gilding rice is the most used in the gold and jewelry industry for making golden coatings. The malleability of this brass is like copper, but its strength is greater; At the same time, it has poor machinability. Very little research has been done on gilding rice. The aim of this research is to improve the mechanical and wear properties of this series of copper alloys using carbon nanotubes.

### 2- Experimental

In this research, multi-walled carbon nanotubes produced by Yoas Nano Company have been used. Cu-5Zn alloy powder with a density of about 8.9 grams per cubic centimeter and a particle size of about 2-10 micrometers

with a purity greater than 99.5%. First, carbon nanotubes were dispersed in 500 ml of ethanol. Ultrasonic waves were used for homogeneous distribution of carbon nanotubes. After adding Cu-5Zn alloy powder into the ethanol solution containing carbon nanotubes, it was stirred for 30 minutes and then the application of ultrasonic waves was stopped and the nanocomposite powder solution was dried at 50 degrees Celsius in an oven. Cu-5Zn alloy powder and carbon nanotubes with different weight percentages (0.25, 0.5, 0.75 and 1) were combined using ultrasonic waves and ball milling. Then, the mixture of copper and carbon nanotubes was pressed and subjected to the sintering process. Hydraulic pressure was chosen to press 35 tons. The powders were pressed in a mold (diameter 30 mm, length 60 mm) and using a pressure of 400 MPa for 5 minutes. In order to prevent friction during the pressing process between the punch and the mold, stearic acid was used as a lubricating agent. Pressing was done for Cu-5Zn alloy powder samples and all nanocomposites with different percentage of carbon nanotubes at a pressure of 400 MPa and for 5 minutes. When the pressing of the samples was finished, the parts were pressed and the nanocomposites were fused through a process. Sintering was done in an electric furnace that included an alumina tube in a controlled argon atmosphere. The selected sintering temperature of the samples was done at 850 degrees Celsius for 120 minutes.

### 3- Results and Discussion

Figure 1 shows electron microscope images of carbon nanotubes before coating and after annealing with nickel. As shown in Figure 1-A, the carbon nanotubes are in cluster form, and in order to break the clusters, they were subjected to ultrasonic waves for 30 minutes in ethanol solution. Ultrasonic waves disperse the carbon nanoplates inside the ethanol.

Figure 1-b shows the SEM image of carbon nanotubes coated with nickel by electrolysis method, in which nickel is coated on the outer walls of carbon nanotubes. The main purpose of creating a nickel coating on carbon nanotubes is to improve the connection between carbon nanotubes and the copper-zinc alloy base. Effective charge transfer

\*Manuscript received: January 31, 2023, Revised: May 28, 2023, Accepted: August 29, 2023.

<sup>1</sup> Corresponding author: Assistance Professor. Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran Email: [alipourmo@tabrizu.ac.ir](mailto:alipourmo@tabrizu.ac.ir)

from metal substrate to carbon nanotubes creates strong nanocomposite and improves mechanical properties.

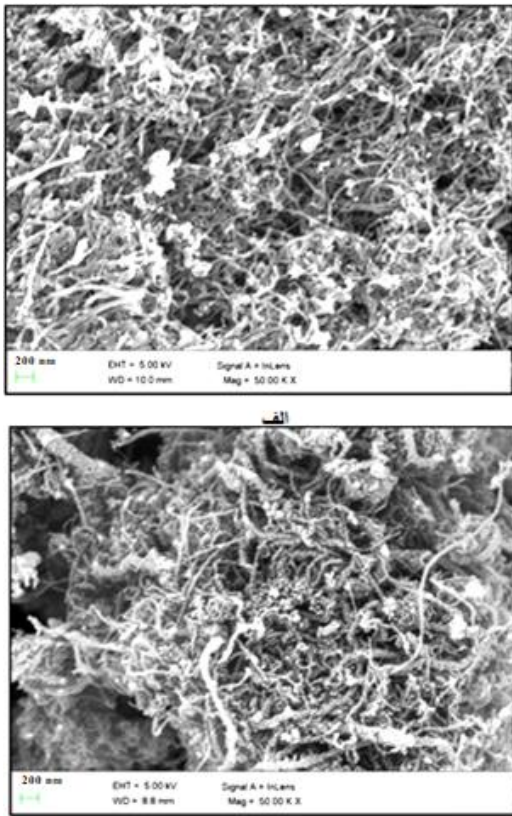


Fig. 1 Scanning electron images of (a) as received and (b) nickel coated carbon nanotubes.

Figure 2 shows the coefficient of friction of copper-zinc alloy and its nanocomposites at a sliding speed of 0.3 m/s. In this test, by increasing the sliding speed, the sliding distance of 5940 meters and the load of 5 Newtons were kept constant for all wear tests. It was observed that with the increase of the sliding speed, the friction coefficient increased for all materials, including copper-zinc alloy and nanocomposites. The coefficient of friction for the nanocomposite with 0.75% by weight of uncoated and coated carbon nanotubes increased from 0.15 to 0.25 and from 0.21 to 0.32, respectively, when the sliding speed changed from 0.3 m/s to 0.9 m/s.



Fig 2 Coefficient of friction of uncoated and nickel coated CNT based copper nanocomposites at sliding speed of 0.3 m s<sup>-1</sup>.

Figure 3 shows the effect of uncoated and nickel-coated carbon nanotubes on the wear rate of copper-zinc nanocomposites. Figure 4 shows the wear rate of nanocomposites coated with carbon nanotubes. In variable loads of 5 newtons and 25 newtons, the sliding speed and distance were kept constant with values of 0.3 m/s and 5940 m, respectively. The estimated wear rate for copper-zinc base alloy was 65\*10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. While for the nanocomposite with 0.75% by weight of uncoated carbon nanotubes, it was equal to 19\*10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/m for a load of 5 Newtons. When the load increases from 5 N to 25 N, the wear rate for copper-zinc base alloy is 85\*10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/m and for nanocomposites with 0.75% by weight of carbon nanotubes without nickel coating, it is 28\*10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/m was obtained.

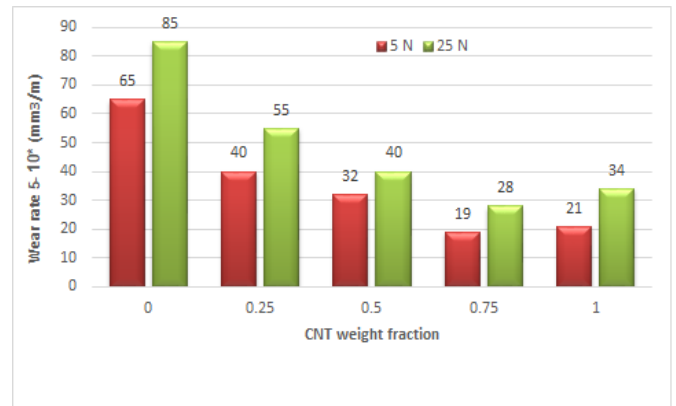


Fig 3 Wear rate of uncoated CNT/Cu nanocomposites at fixed sliding speed of 0.3 m s<sup>-1</sup>.

#### 4- Conclusion

- Copper-zinc nanocomposites reinforced with carbon nanotubes coated with nickel and without nickel coating were successfully prepared using the primary process of powder metallurgy and pressing was used as a secondary process.
- By increasing the content of carbon nanotubes, the coefficient of friction of copper-zinc nanocomposites reinforced with carbon nanotubes coated with nickel and without nickel coating decreased.
- The decrease in the friction coefficient of copper nanocomposites compared to copper-zinc base alloy is related to the lubrication effect of carbon nanotubes.
- The amount of wear for both nanocomposites reinforced with nickel coating and without coating decreased with the increase of carbon nanotubes. The low wear rate of these nanocomposites is related to the high hardness and the limitation of wax flow by carbon nanotubes.
- With increasing load from 5 newtons to 25 newtons and wear speed from 0.3 m/s to 0.9 m/s, the wear rate of copper-zinc nanocomposites reinforced with carbon nanotubes with nickel coating and without coating has increased.
- Factors such as adhesion, flaking and oxidative wear are effective in examining the wear levels of copper-zinc base alloy and its nanocomposites.



## بررسی رفتار سایشی نانوکامپوزیت زمینه آلیاژ Cu-5Zn تقویت شده با نانولوله های کربنی\*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور<sup>(۱)</sup>

DOI: 10.22067/jmme.2023.80885.1103

**چکیده** در تحقیق حاضر، نانوکامپوزیت های زمینه آلیاژی مس-روی با فاز تقویت کننده نانولوله های کربنی مورد مطالعه قرار گرفت. نانولوله های کربنی در هر دو حالت بدون پوشش و با پوشش نیکل، به عنوان تقویت کننده نانوکامپوزیت مس-روی مورد استفاده قرار گرفتند. نانوکامپوزیت ها با درصدهای مختلف از نانولوله های کربنی (۱-۲۵، در صد وزنی) با استفاده از امواج الترا سونیک، آ سیاب گلوله ای، زیتتر تهیه شدند. برای بررسی ساختاری و مورفولوژی نانوکامپوزیت ها و پراکنندگی نانولوله های کربنی از SEM استفاده شد. اثر نانولوله های کربنی بر خواصی همچون اصطکاک و سایش نانوکامپوزیت های مس با استفاده از روش استاندارد ASTM-G99 بررسی شد. ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت های تقویت شده با ۱٪ وزنی فاز تقویت کننده نانولوله های کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل در مقایسه با آلیاژ پایه مس-روی کاهش پیدا کرده و به طور مشابهی، میزان سایش نانوکامپوزیت ها با افزایش تقویت کننده نانولوله های کربنی نیز کاهش یافته است. پایین بودن ضریب اصطکاک و میزان سایش، به پراکنندگی یکنواخت نانولوله های کربنی و تشکیل لایه روانکار از کربن بر روی سطح نانوکامپوزیت در طی مراحل سایش مربوط است.

**واژه های کلیدی** نانولوله های کربنی، مس، اصطکاک و سایش، نانوکامپوزیت.

### Investigating the Wear Behavior of Nanocomposite Based on Cu-5Zn Alloy Reinforced with Carbon Nanotubes

Mohammad Alipour

**Abstract** In the present work we report the development of carbon nanotube reinforced copper-zinc alloy nanocomposites. The carbon nanotubes were used in both uncoated and nickel coated conditions to reinforce copper matrix. The nanocomposites with different carbon nanotubes (0.25 to 1.0) weight percentage were developed using a combination of ultrasonication, ball milling and sintering processes. The developed nanocomposites were subjected to microstructural characterization using scanning and transmission electron microscopes to observe the dispersion of carbon nanotubes. The effect of carbon nanotubes on friction and wear properties of copper nanocomposites were studied using pin on disc testing rig as per ASTM G99 standard. The coefficient of friction of both 1 wt% uncoated and nickel coated carbon nanotubes reinforced nanocomposites was found when compared to copper-zinc alloy. Similarly the wear rate of nanocomposites were found to decrease with the incorporation of carbon nanotubes. The low coefficient of friction and wear rate were attributed to uniform dispersion of carbon nanotubes and formation of carbonaceous layer on the surface of nanocomposites during dry sliding wear.

**Key Words** Carbon Nanotubes, Copper, Friction and wear, Nanocomposites.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۱/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۶/۷ می باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

## مقدمه

حوزه نانو مواد، توجه و تمرکز بسیاری از دانشمندان و مهندسان را در سراسر جهان به خود معطوف کرده است. به این به ترتیب با توجه به اینکه این مواد انعطاف پذیری بالایی دارند خواص ممتازی جهت سنتز مواد نانویی جدید را از خود نشان می دهند. مواد نانو ساختار ابعاد ذرات کوچکتر از 100 نانومتر دارند [1,2]. در این پژوهش نانولوله های کربنی مورد بررسی قرار گرفته است. در سال 1991، سامیو لیجیما (Sumio Iijima) از شرکت NEC سنتز ساختار کربن سوزنی شکل را گزارش کرد. مطالعات میکروسکوپ الکترونی بر روی ساختار سوزنی نشان داد که هر سوزنها شامل لوله های گرافیتی است که تعداد آنها بین 2-50 عدد است. لوله های گرافیتی با استفاده از تخلیه قوس با گاز آرگون سنتز شدند و کربن ها در انتهای الکتروود منفی رشد کردند. نانولوله های کربن به صورت ورقه گرافنی به شکل لوله با قطر نانومتری تشکیل شده اند [3-6]. معمولا نانو لوله های کربنی به دو شکل یافت می شوند: نانو لوله های تک دیواره (SWCNTs) که به شکل لوله ای تک دیواره است و نانو لوله های چند دیواره (MWCNTs): که دارای لایه گرافن اضافی به دور نانو لوله تک دیواره هستند. نانو لوله های کربنی دارای استحکام فوق العاده ای از 63 GPa و مدول یانگ 1 TPa می باشند که در افزایش ظرفیت تحمل بار زمینه مفید هستند. طول عمر و ظرفیت الکتریکی آن حدود 1000 برابر بیشتر از فلز مس است که در حال حاضر کاربرد زیادی در صنایع الکترونیکی دارد [6-8]. با توجه به قابلیت های گسترده نانو لوله های کربنی در کامپوزیت ها، آن را برای کاربردهای مکانیکی، الکتریکی و حرارتی امکان پذیر ساخته است [9-13]. سامال کریپی (Sammalkorpi) و همکارانش [12] با استفاده از شبیه سازی دینامیک مولکولی و نظریه پیوستگی، حفره های مربوط به نقص در مدول یانگ و استحکام کششی نانو لوله های کربن را بررسی کردند. کاربرد نانو لوله های کربنی به عنوان فاز تقویت کننده در نانوکامپوزیت ها و با توجه به بهبود سختی، استحکام و چقرمگی کامپوزیت ها، توجه زیادی از دانشمندان را به خود جلب نموده است. زمینه های فلزی مورد استفاده عبارتند از آلومینیوم و مس [14-17] منیزیم [18]، نیکل [19] و تیتانیوم [20]. این نانوکامپوزیت ها با روش های مختلفی از جمله متالورژی پودر، ریخته گری، اسپری حرارتی، رسوب دهی الکتریکی ساخته شده اند [20]. وو (Wu) و همکارانش [21]

کامپوزیت های AA 6061/CNT را با روش پودر نیمه جامد جهت بهبود پراکندگی نانولوله های کربنی تهیه کردند. پراکندگی نانولوله های کربنی وابسته به مدت زمان آلیاژسازی مکانیکی است. اما با این وجود، تشکیل Al4C3 و کاهش قابلیت انعطاف پذیری کامپوزیت را مشاهده کردند. Chen و همکارانش [22] کامپوزیت های Cu/CNT با استفاده از روش متالورژی پودر و تقویت کننده نانولوله های کربنی با پوشش نیکل تهیه کردند. سختی کامپوزیت های Cu/CNT با افزایش کسر حجمی نانو لوله های کربنی افزایش یافت. باکشی (Bakshi) و همکارانش [23] نانوکامپوزیت Al-Si/MWCNT با استفاده از روش اسپری گاز سرد تهیه نمودند. آنها با استفاده از روش تعیین ساختار نانویی، مدول الاستیک که در محدوده 40-120 GPa برای کامپوزیت نامبرده با پوشش به ضخامت 500 میکرون و سطوح شکسته یکنواختی از نانو لوله های کربنی در زمینه مس تهیه کردند. در این تحقیق مدول کمتر مربوط به مکان هایی با تخلخل زیاد و مدول بالا مربوط به مکان هایی با سیلسیم زیاد می باشد. Chen و همکارانش [24] کامپوزیت Ni/CNT را با استفاده از روش الکترولیز تهیه نموده و خواص سایشی آن را مورد بررسی قرار دادند و کاهش در ضریب اصطکاک با افزایش بار از 10 نیوتن به 30 نیوتن مشاهده کردند. روش متالورژی پودر برای تهیه نانوکامپوزیت ها با مخلوط و آماده سازی پودر فلز با نانو لوله های کربنی و با فشردن آن و در صورت لزوم از فرایندهای ثانویه مانند اکستروژن یا آهنگری استفاده شد. برخلاف سایر تکنیک های تولید، متالورژی پودر دارای مزایای متفاوتی مانند حذف ماشین کاری، سرعت بالای تولید، تولید اشکال پیچیده و تغییرات گسترده در ترکیبات می باشد. در حال حاضر مس به عنوان زمینه ای برای مواد کربنی از جمله گرافیت و گرافن به کار برده شده و نانولوله های کربنی به عنوان مواد خود روان کار ترجیح داده می شوند. این امر عمدتاً سبب هدایت الکتریکی و حرارتی بالای و ضریب اصطکاک پایین برای فلز مس شده که بدلیل قابلیت روانکاری نانولوله ها می باشد. بسیاری از این کامپوزیت ها با روش متالورژی پودر تهیه شده اند [25]. با در نظر گرفتن خواص مکانیکی فوق العاده نانولوله های کربنی و توانایی روانکاری آن، تعدادی از کارهای تحقیقاتی برای بررسی خواص نسبی کامپوزیت مس با تقویت کننده مواد کربنی انجام شده است. گویدردونی (Guiderdoni) و همکارانش [26]

سری از آلیاژهای مس با استفاده از نانولوله های کربنی می باشد.

### روش تحقیق

#### مواد و روش ها

نانولوله های کربنی با طول 5-10 میکرومتر، قطر خارجی 30-50 نانومتر، قطر داخلی 5-10 نانومتر و خلوص  $> 95\%$  که با روش (CVD) بخار رسوب شیمیایی تهیه شده بودند مورد استفاده قرار گرفتند. پودر آلیاژی مس-روی با ترکیب ۹۵ درصد مس و ۵ درصد روی، اندازه ذرات 2-10 میکرومتر و درصد خلوص  $> 99.5\%$  از شرکت Chemie. Pvt. Ltd. India

خریداری شد. برای جلوگیری از تشکیل کلوخه ها که در اثر تجمع نانو لوله های کربنی به وجود می آید، محلول به مدت 30 دقیقه در محلول اتانول در معرض امواج آلتراسونیک قرار داده شد. نانو لوله های کربنی با پوششی از نیکل تهیه شدند. خلاصه-ای از فرایندهای ارائه شده به شرح زیر است. برای شروع از محلول  $HNO_3$  (68%) جهت اصلاح سطح استفاده شد. پوشش الکتریکی نیکل در حمام نیکل که حاوی نمک های مختلف بود در حدود 30 دقیقه انجام شد. نانو لوله های کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل با پودر مس-روی در محلول اتانول تحت امواج آلتراسونیک هم زده شدند. بعد از 60 دقیقه دوغاب نانوکامپوزیت در داخل کوره در دمای 50 درجه سانتیگراد خشک شد. کامپوزیت ها با غلظت های متفاوتی از نانولوله های کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل (0.25، 0.5، 0.75 و 1) تحت فرآیند آسیاب مکانیکی تحت اتمسفر گاز آرگون قرار گرفتند که از گلوله ضد زنگ فولادی برای آسیاب کردن نمونه ها استفاده شد. پارامترهای انتخابی برای آسیاب گلوله ای عبارتند از: نسبت گلوله به پودر 10 به 1، سرعت 200 دور بر دقیقه و زمان 60 دقیقه.

در زمان آسیاب کردن نمونه ها، یک وقفه متناوب 5 دقیقه ای در هر 15 دقیقه به منظور جلوگیری از جوش سرد ذرات و افزایش دمای پودرها اعمال شد. فشرده سازی سرد پودرهای مخلوط شده با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی با فشار 400 مگاپاسکال برای 5 دقیقه انجام شد. پودر مس-روی و نانوکامپوزیت (نمونه های آماده شده) تحت فرآیند زیتتر در کوره الکتریکی در دمای 850 درجه سانتیگراد به مدت 120 دقیقه تحت اتمسفر کنترل شده، قرار گرفتند. سپس نمونه ها بعد از اتمام زیتتر از کوره خارج شده و تحت فرآیند آننگری قرار گرفتند. اعمال فشار جانبی بر روی نمونه ها در دمای محیط، تا دستیابی به ضخامتی 8 میلی متر ادامه داشت. نمونه اولیه استوانه

سختی، اصطکاک و سایش نانوکامپوزیت های مس را با تقویت کننده نانولوله کربنی با دیواره دو جداره بررسی کردند. مشاهده شده است که سختی نانوکامپوزیت ها 50% بیشتر از مس خالص است. ضریب اصطکاک پایین تر در سرعت پایین تر سایش به ترتیب 4 و 20 برابر به ترتیب نسبت به مس خالص برای نانوکامپوزیت ها بدست آمد. مواد کربنی تشکیل شده در طول آزمایش ها با لایه های مکانیکی مخلوط شده که باعث کاهش سرعت سایش و ضریب اصطکاک شده است. Lin و همکارانش [27] خواص سایشی کامپوزیت های مس با تقویت کننده نانو لوله کربنی با انجام آزمایش سایش را بررسی کردند. کامپوزیت های با 15%-10% درصد وزنی نانولوله کربنی می تواند نرخ سایش و ضریب اصطکاک را کاهش دهد. بعد از اضافه کردن نانولوله کربنی به کامپوزیت، میزان تغییر شکل پلاستیک در طی آزمون سایش کاهش یافت. با افزایش سرعت لغزش، میزان سایش با توجه به تشکیل فیلم کربن روانکاری بر روی سطح کاهش می یابد. در کار دیگری هانگ (Huang) و همکارانش [28] خواص سایشی کامپوزیت ها با تقویت کننده نانومتری در زمینه مس را بررسی کردند که میزان سایش زمینه مس با تقویت کننده نانو لوله کربن 90% نسبت به مس خالص کمتر می باشد. این به شکل گیری فیلم روان کننده جامد روی سطح سایش کامپوزیت مربوط می شود. در طول آزمون سایش، نانولوله های کربن از زمینه مس جدا شده و سپس بر روی سطح سایش یک لایه روان کننده جامد تشکیل می دهند. با توجه به رفتار تقویتی و روانکاری نانو لوله های کربنی، این تحقیق به بررسی رفتار سایشی نانوکامپوزیت های Cu-Zn/CNT پرداخته است و نانوکامپوزیت مس-روی با روش متالورژی پودر و فرآیند آننگری ساخته شد. آزمون سایش بر اساس روش پین بر روی دیسک بر اساس استاندارد G99، پارامترهای اصطکاک و سایش در بارهای مختلف و همچنین سرعت لغزش متفاوت مورد مطالعه و بحث قرار گرفته است.

دلیل استفاده از آلیاژ Cu-5Zn، این آلیاژ معروف به برنج طلاکاری (با ۵ درصد روی) می باشد. برنج طلاکاری بیشترین کاربرد را در صنعت طلا و جواهرسازی برای ساخت روکش های طلایی رنگ دارد. شکل پذیری این برنج مانند مس است اما استحکام آن بیشتر است؛ در ضمن قابلیت ماشینکاری ضعیفی دارد. تحقیقات خیلی کمی بر روی برنج طلاکاری انجام شده است. هدف از این پژوهش بهبود خواص مکانیکی و سایشی این

کربنی قبل از پوشش‌دهی بعد از ژوشش دهی با نیکل نشان داده است. همانطور که در شکل (الف-۱) نشان داده شده است، نانولوله های کربنی در فرم خوشه ای قرار دارند و به منظور شکستن خوشه ها، به مدت 30 دقیقه در محلول اتانول، تحت امواج اولتراسونیک قرار گرفتند. امواج اولتراسونیک باعث پراکندگی نانولوله های کربنی در داخل اتانول می شوند.

شکل (ب-۱) تصویر SEM از نانولوله های کربنی پوشش داده شده با نیکل با روش الکترولیز را نشان می دهد که در آن نیکل بر روی دیواره های خارجی نانولوله های کربنی پوشیده شده است. هدف اصلی ایجاد پوشش نیکل بر روی نانولوله های کربنی، بهبود اتصال بین نانولوله های کربنی و زمینه آلیاژ مس-روی است. انتقال بار موثر از زمینه فلز به نانولوله های کربنی باعث ایجاد نانوکامپوزیت قوی و بهبود خواص مکانیکی می شود. لازم است نانولوله های کربنی با زمینه برای انتقال بهتر بار، پیوند خوبی داشته باشند. علاوه بر این، زاویه ترشوندگی بین نانولوله های کربنی و زمینه با پوشش دهی با فلز نیکل بهبود یافت. دو جاردین (Dujardin) و همکاران [29] دریافتند که عامل تعیین کننده برای زاویه ترشوندگی کشش سطحی است.

ای به قطر 15 میلی متر و ارتفاع 20 میلی متر می باشد که بعد از اعمال فشار جانبی به ضخامت حدود 8 میلی متر و طول حدود 30 میلی متر می رسد.

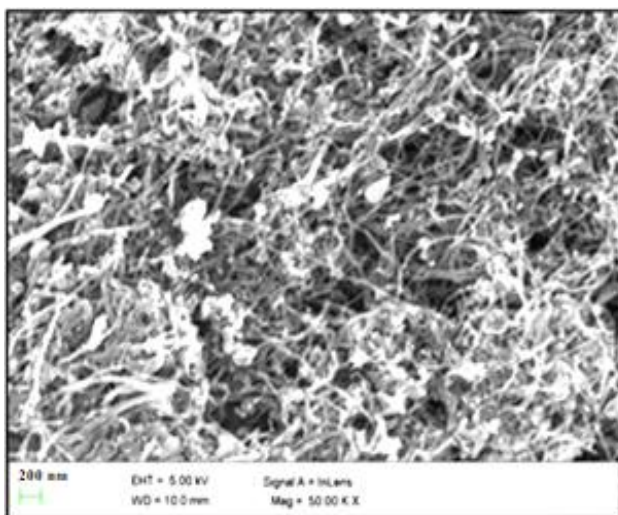
### آزمون و مشخصات

پراکندگی نانولوله های کربنی با پوشش و بدون پوشش نیکل در زمینه آلیاژی مس-روی با استفاده از میکروسکوپ های SEM مدل SEM-TESCAN MIRA3-FEG مورد بررسی قرار گرفت. اثرات افزایش نانولوله های کربنی بر روی نانوکامپوزیت با آزمون سایش لغزشی با استفاده از روش پین بر روی دیسک بر اساس روش استاندارد ASTM G99 مطالعه شد. آزمون های سایش لغزشی تحت شرایط محیطی (درجه حرارت 24 درجه سانتیگراد، رطوبت 50٪) با سرعت لغزش متغیر از 0.3 تا 0.9 متر بر ثانیه برای مسافت لغزشی 5940 متر و تحت بارهای 5 و 25 نیوتن انجام شد. در ضمن، میزان سایش نمونه ها با استفاده از کاهش وزن نمونه ها در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

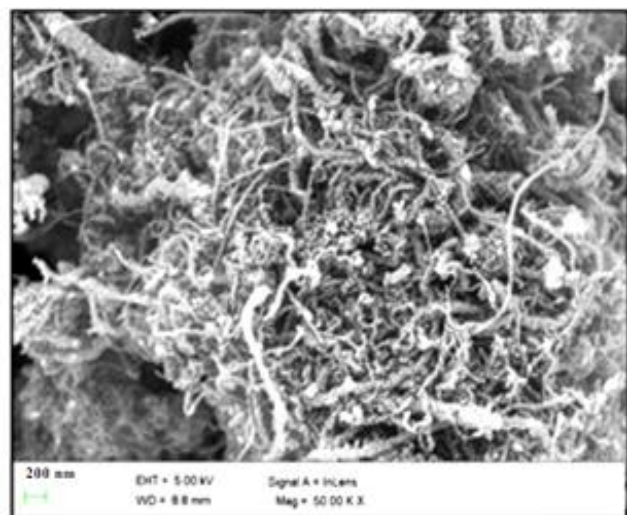
### نتایج و بحث

#### مطالعات ریزساختاری

در شکل (۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانولوله های

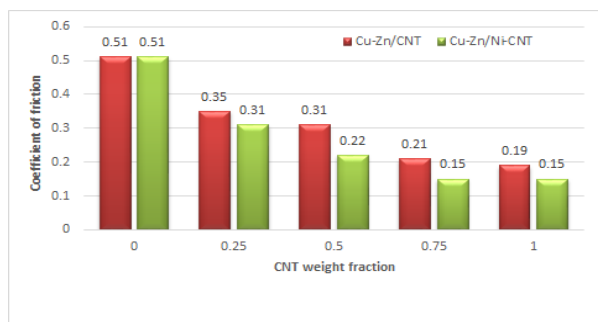


الف



ب

شکل ۱ عکس های میکروسکوپ الکترونی: (الف) نانولوله های کربنی پایه و (ب) پوشش داده شده



شکل ۲ ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌های پوشش داده شده با نیکل و بدون نیکل در سرعت سایش 0.3 متر بر ثانیه

### اثر سرعت لغزشی

شکل (۲) و (۳) ضریب اصطکاک آلیاژ مس-روی و نانوکامپوزیت‌های آن را در دو سرعت لغزش 0.3 و 0.9 متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. در این آزمون با افزایش سرعت لغزش از 0.3 تا 0.9 متر بر ثانیه، مسافت لغزشی 5940 متر و میزان بار 5 نیوتن برای تمام آزمون‌های سایشی ثابت نگه داشته شد. مشاهده شد که با افزایش سرعت لغزشی، ضریب اصطکاک برای تمام مواد از جمله آلیاژ مس-روی و نانوکامپوزیت‌ها افزایش یافته است. ضریب اصطکاک برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بدون پوشش و با پوشش به ترتیب از 0.15 به 0.25 و از 0.21 به 0.32 زمانی که سرعت لغزش از 0.3 متر بر ثانیه به 0.9 متر بر ثانیه تغییر کرد، افزایش یافت.

علت احتمالی افزایش ضریب اصطکاک در آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت‌ها با افزایش سرعت لغزشی از 0.3 متر بر ثانیه به 0.9 متر بر ثانیه، فرآیند اکسیداسیون است. هنگامی که سرعت لغزش افزایش می‌یابد دمای بین نمونه و سطح مقطع دیسک در طول آزمون سایشی نیز افزایش خواهد یافت. این افزایش دما در محل اتصال آلیاژ پایه و نانو لوله‌های کربنی می‌تواند منجر به اکسیداسیون سطوح تماس نمونه با سطح مقطع دیسک شود. با افزایش سرعت سایشی، لایه اکسیدی که روی سطح نمونه تشکیل شده است، تمایل به شکستن دارند که موجب سایش در بدنه نانوکامپوزیت می‌شود. این پدیده قالب در این مورد منجر به افزایش ضریب اصطکاک در سرعت سایشی بالاتر می‌شود [32,33] دلیل دوم افزایش ضریب اصطکاک این است که با افزایش سرعت لغزشی، کرنش مومسایی در آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت‌های آن در طی آزمون‌های لغزشی افزایش یافته است که احتمال چسبندگی بین نمونه‌ها و سطح مقطع را افزایش می‌دهد. اما در سرعت پایین سایشی، حضور نانو لوله‌های کربنی

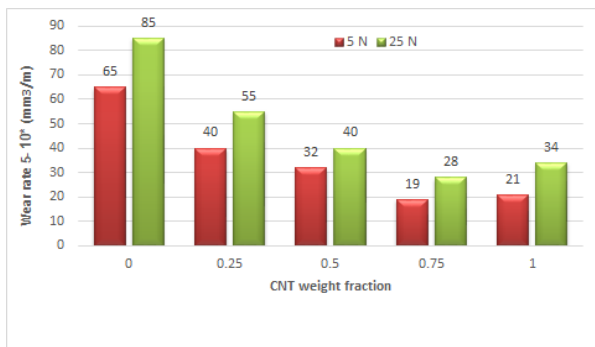
## مطالعه ضرایب اصطکاک

### اثر تقویت کننده

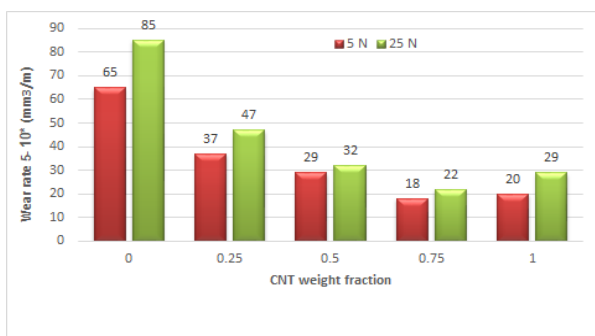
شکل (۲) اثر مقدار متفاوت نانولوله‌های کربنی با پوشش نیکل و بدون آن بر روی ضرایب اصطکاک نانوکامپوزیت‌های مس-روی نشان داده شده است. در اینجا مسافت لغزشی و مقدار نیروی اعمالی به ترتیب 5940 متر و 5 نیوتن انتخاب شد. مشاهدات حاکی از آن است که نانوکامپوزیت‌ها با نانو لوله‌های کربنی بدون پوشش و پوشش نیکل در مقایسه با آلیاژ پایه مس-روی ضریب اصطکاک کمتری دارد.

کاهش در ضریب اصطکاک کامپوزیت با 1 درصد وزنی نانو لوله کربنی بدون پوشش نیکل و با پوشش نیکل در مقایسه با آلیاژ پایه به ترتیب 60.41٪ و 70.83٪ بدست آمد و این عمدتاً به دلیل پراکندگی یکنواخت نانو لوله‌های کربنی می‌باشد. نانو لوله‌های کربنی به صورت همگن به خاطر عملیات پرس پراکنده شده‌اند. از آن جایی که فرایند پرس موجب شکستن کلوخه‌های نانو لوله‌های کربنی شده است در نتیجه نانو لوله‌های کربنی در زمینه مس به صورت یکنواخت پراکنده شده‌اند. در ضمن کاهش در ضریب اصطکاک در نانوکامپوزیت‌های مس-روی در مقایسه با مس-روی پایه عمدتاً منجر به روانکاری به علت وجود نانولوله‌های کربنی شده است. در طول آزمون سایشی نانو لوله‌های کربنی در تماس با سطح مقطع دیسک بوده است. مقدار لایه روانکاری مبتنی بر نانولوله‌های کربن بستگی به درصد نانو لوله‌های کربنی دارد. مقدار لایه روانکاری با افزایش درصد نانو لوله کربنی در نانوکامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین کمترین ضریب اصطکاک برای نانوکامپوزیت‌ها با بیشترین مقدار درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی (0.75 درصد) مشاهده شده است. در آلیاژ پایه، میزان کرنش خمیری بالا بوده و میزان چسبندگی دانه‌ها با سطح دیسک بالا بوده که موجب بالا رفتن ضریب اصطکاک برای آلیاژ پایه شده است. شکل (۲) همچنین نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک در نانوکامپوزیت با 1 درصد وزنی نانولوله کربنی نسبت به 0.75 درصد نانولوله کربنی ثابت بوده است. می‌توان علت احتمالی این پدیده در نانوکامپوزیت تقویت شده با 1 درصد وزنی نانو لوله کربنی را تجمع نانو لوله‌های کربنی در زمینه و کاهش اثر روانکاری مربوطه دانست [30,31].

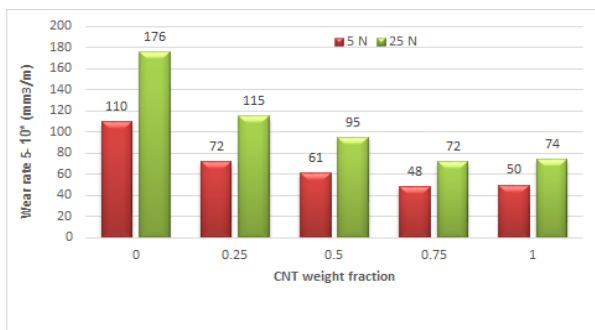
داده شده با نیکل  $18 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$  برای بار 5 نیوتن بدست آمد. هنگامی که بار از 5 نیوتن تا 25 نیوتن افزایش یافت، سرعت سایشی برای آلیاژ پایه مس-روی  $85 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  است در حالی که سرعت سایشی برای نانوکامپوزیت تقویت شده با 0.75 درصد وزنی نانو لوله های کربنی با پوشش نیکل،  $22 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  بدست آمد.



شکل ۴ نرخ سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله های پوشش داده نشده در سرعت سایش 0.3 متر بر ثانیه



شکل ۵ نرخ سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله های پوشش داده شده با نیکل در سرعت سایش 0.3 متر بر ثانیه



شکل ۶ نرخ سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله های پوشش داده نشده در سرعت سایش 0.9 متر بر ثانیه

در نانوکامپوزیت ها موجب کاهش کرنش مومسانی خواهد شد که ضریب اصطکاک کاهش می یابد. اما در سرعت لغزش بالاتر، کرنش مومسانی با افزایش چسبندگی موضعی افزایش خواهد یافت. بنابراین در سرعت لغزشی بیشتر، ضریب اصطکاک در آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت های آن بیشتر می شود [34,35].



شکل ۳ ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله های پوشش داده شده با نیکل و بدون نیکل در سرعت سایش 0.9 متر بر ثانیه

## رفتار سایشی

### اثر فاز تقویتی

شکل (۴) تا (۷) اثر نانولوله کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل بر روی میزان سایش نانوکامپوزیت های زمینه مس-روی را نشان داده است. برای شکل (۴) سرعت سایش نانوکامپوزیت ها با نانولوله های کربنی پوشش داده شده را نشان می دهد. در بارهای متغیر 5 نیوتن و 25 نیوتن، سرعت و فاصله لغزشی به ترتیب با مقادیر 0.3 متر بر ثانیه و 5940 متر ثابت نگه داشته شد. سرعت سایش تخمینی برای آلیاژ پایه مس-روی  $65 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  بدست آمد. در حالی که برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد وزنی نانو لوله های کربنی بدون پوشش برابر با  $19 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  برای 5 نیوتن بدست آمد. هنگامی که بار از 5 نیوتن به 25 نیوتن افزایش می یابد، سرعت سایش برای آلیاژ پایه مس-روی  $85 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  و برای نانوکامپوزیت های با 0.75 درصد وزنی نانو لوله های کربنی بدون پوشش نیکل  $28 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  بدست آمد. کاهش شکل (۵) سرعت سایش نانوکامپوزیت ها با نانو لوله های کربنی پوشش داده شده با نیکل را در بار 5 نیوتن و 25 نیوتن و سرعت سایشی و فاصله سایشی به ترتیب برابر با 0.3 متر بر ثانیه و 5940 متر نشان داده است. سرعت سایش تخمینی برای آلیاژ پایه مس-روی  $65 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  بدست آمد در حالی که برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد وزنی نانولوله های کربنی پوشش

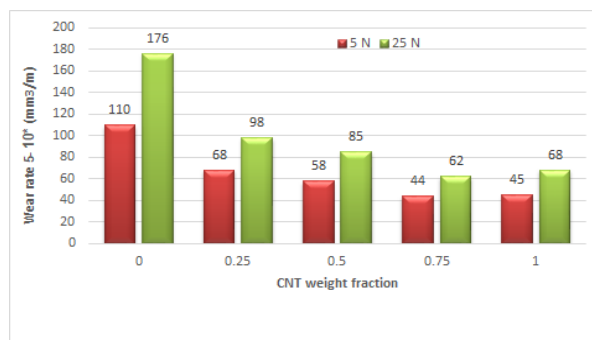


$48 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  مشاهده شد در حالی که کمترین نرخ سایشی  $176 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد نانو لوله کربنی بدست آمد. نرخ سایش برای بار 25 نیوتن و سرعت 0.9 متر بر ثانیه، برای آلیاژ پایه مس-روی  $176 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  بدست آمد در حالی که برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد نانو لوله کربنی با پوشش نیکل، نرخ سایشی  $72 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$  بدست آمد. برای هر دو مقدار بار گذاری بالاتر و پایین تر، نرخ سایش برای آلیاژ پایه مس-روی به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از نانوکامپوزیت بود. علاوه بر این می توان مشاهده کرد که نرخ سایش برای آلیاژ پایه مس-روی در مقایسه با نانوکامپوزیت های تقویت شده با نانو لوله های کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل کلا افزایش یافته است. با توجه به افزایش نانو لوله های کربنی، میزان سایش در مقایسه با آلیاژ پایه مس-روی کاهش می یابد.

تحقیقات انجام شده نشان داده اند که نرخ سایش به میزان بار اعمال شده وابسته است. بنابراین اگر بار یا فشار روی مس و نانوکامپوزیت ها از 5 نیوتن به 25 نیوتن افزایش یابد، نرخ سایش نیز به صورت خطی افزایش می یابد. در میزان بار بالاتر، زبری های سطح مقطع به سطح آلیاژ مس-روی و نانوکامپوزیت ها نفوذ کرده که منجر به افزایش سرعت حذف مواد می شود. با این حال میزان سایش نانوکامپوزیت ها در مقایسه با آلیاژ پایه مس-روی کمتر بوده که به علت وجود نانو لوله های کربنی می باشد که موجب کاهش نرخ سایش به علت خاصیت روانکاری در سطح مشترک شده است.

### آنالیز سطوح سایش

شکل های (۸) تا (۱۰) نشان دهنده تصویر SEM از سطح سایش آلیاژ پایه مس-روی و نانوکامپوزیت های آن در دو بار مختلف و سرعت لغزش ثابت 0.3 متر بر ثانیه و فاصله لغزشی 5940 متر است. در شکل (۸) تصویر SEM از سطح آلیاژ پایه مس-روی که در آن شیارهایی در بار کم 5 نیوتن دیده شده در حالی که تغییر توده مومسانی با شیارهایی در بار 25 نیوتن دیده شده است که این تغییر شکل (توده مومسانی) موجب شکست در سطح مس در بار بیشتر شده است. کرنش برشی تولید شده در طی سایش به سطح مس منتقل شده و باعث ایجاد ترک هایی کوچک زیر سطحی و شیارهای کوچک در آلیاژ پایه مس-روی شده است. شیارها در هر دو بار پیوسته و موازی با جهت سایشی بوده و سبب نفوذ زبری های سخت سطح مقطع دیسک به زمینه نرم



شکل ۷ نرخ سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله های پوشش داده شده با نیکل در سرعت سایش 0.9 متر بر ثانیه.

علاوه بر این به علت سختی بالای نانو لوله های کربنی، جریان مومسانی زمینه در طول سایش لغزشی محدود می شود. هرچه قدر میزان مقدار نانو لوله های کربنی بیشتر باشد کرنش برشی بیشتری برای جریان مومسانی از زمینه در نانوکامپوزیت مربوط به آن لازم است. محدودیت ناشی از نانو لوله های کربنی این است که چرا نانوکامپوزیت ها نسبت به آلیاژ پایه مس-روی سایش کمتری دارند. مقاومت به سایش با افزایش محتوای نانو لوله های کربنی و پراکندگی بهتر آن در زمینه فلز مس افزایش می یابد. با این حال در نانوکامپوزیت با 1 درصد وزنی نانو لوله کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل، نرخ سایش افزایش جزئی یافته است. افزایش نرخ سایش این نانوکامپوزیت ها می تواند به علت ایجاد کلوخه های نانو لوله های کربنی یک ناحیه ضعیف در زمینه مس-روی ایجاد می کنند که موجب کاهش میکروسختی می شود. علاوه بر این، عدم وجود لایه کربن روان کننده، تماس فلز با فلز را افزایش داده و به علت سختی ضعیف و لایه روانکاری ناکافی، زبری های سطح مقطع به راحتی به سطح نانوکامپوزیت نفوذ کرده که منجر به افزایش میزان سایش شده است [30].

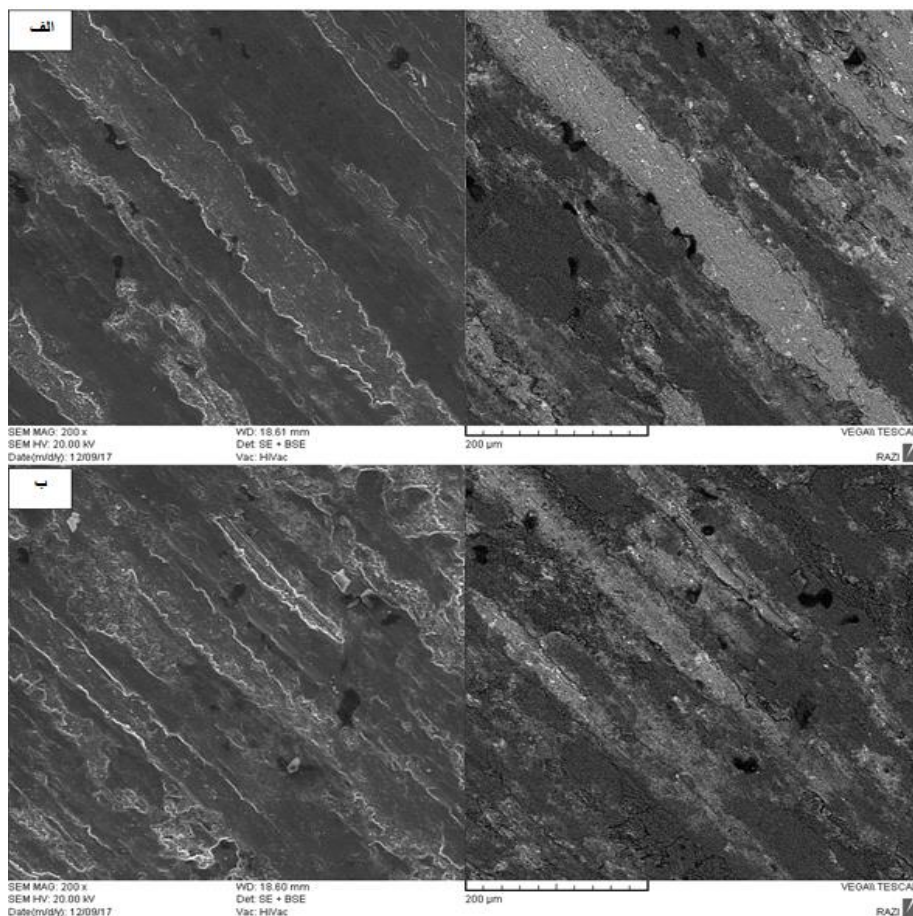
### اثر سرعت لغزشی

اثر سرعت لغزشی بر میزان سایش آلیاژ پایه مس-روی و نانوکامپوزیت های آن در شکل های (۶) و (۷) در سرعت های لغزشی 0.3 و 0.9 متر بر ثانیه نشان داده شده است. برای تمام آزمون های لغزشی فاصله 5940 متر ثابت نگه داشته شد. با افزایش سرعت لغزشی همه مواد از جمله مس-روی و نانوکامپوزیت های آن افزایش در نرخ سایش دیده شد. برای بار 5 نیوتن، بیشترین نرخ سایشی برای آلیاژ پایه مس-روی  $110 \times 10^{-5}$

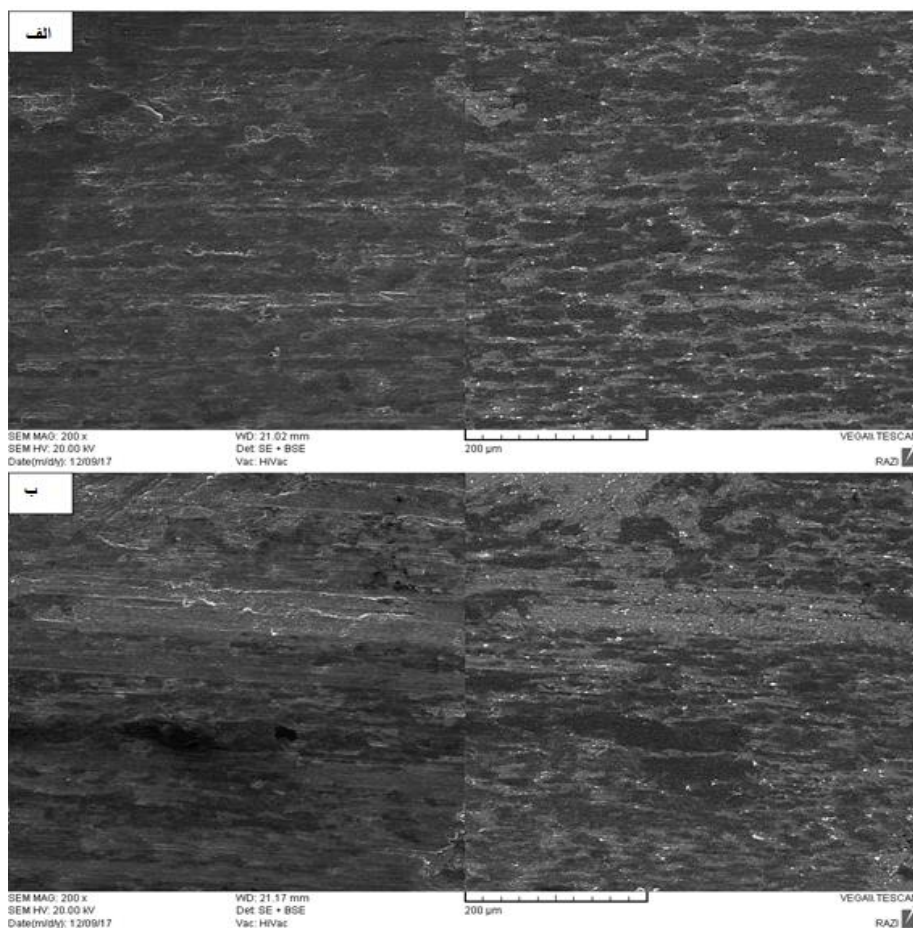
امرعمداتاً به دلیل پیوند مشترک بین نانولوله‌ها با پوشش نیکل و زمینه است که به شدت مقاومت در برابر تغییر شکل مومسانی و میکروشیارها را از خود نشان داده است. علاوه بر این در نانوکامپوزیت‌های مس-روی، شیارهای سایشی مشاهده شده اما عمق و عرض آن شیارها به اندازه آلیاژ پایه مس-روی نیست. این عمدتاً به دلیل خواص انتقال بار نانو لوله‌های کربنی مربوط است که به زمینه در بارهای بالاتر کمک کرده است. علاوه بر افزایش محتوای نانو لوله‌های کربنی، محدودیت تغییر شکل مومسانی یا جریان زمینه افزایش یافته و همچنین مقاومت در برابر کشش، در طی آزمون سایشی، می‌تواند به علت وجود پیوند مشترک بین نانولوله‌ها با پوشش نیکل و زمینه باشد. باتوجه به این اتصال خوب، میزان کشش نانو لوله‌ها حداقل بوده که در سطوح نسبتاً صاف نانوکامپوزیت‌ها منعکس شده است. از این رو در سطح نانوکامپوزیت‌ها، ویژگی‌هایی همچون شیارهای پوششی خوب و حداقل میزان جدایش لایه از سطوح بارگذاری در بارهای پایین‌تر دیده شده است [36,37].

مس-روی شده که منجر به افزایش سایش شده است. با افزایش بار از 5 نیوتن به 25 نیوتن، عمق سایشی افزایش یافته و در عین حال در گستره وسیعی جدا شدن لایه از سطح دیده می‌شود. شکل (۹)، تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوکامپوزیت‌های حاوی 0.25 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی را در بارهای مختلف 5 نیوتن و 25 نیوتن و سرعت لغزش ثابت 0.3 متر بر ثانیه و مسافت لغزش 5940 متر نشان می‌دهد. سطح سایش از میکروشیارها و مقدار کمی از تغییر شکل مومسانی در نانوکامپوزیت 0.25 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی در بارهای 5 نیوتن و 25 نیوتن در شکل (۹) نشان داده شده است.

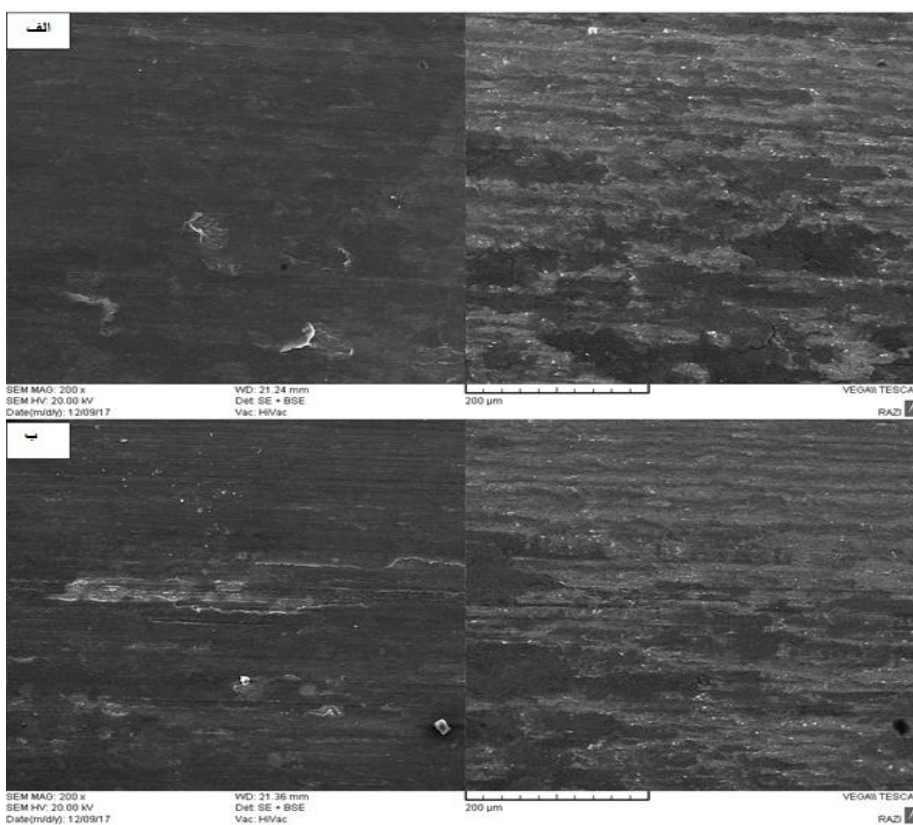
شکل (۱۰) سطوح سایش یافته نانوکامپوزیت‌های حاوی 0.25 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی با پوشش نیکل در بارهای مختلف 25 نیوتن و 5 نیوتن نشان داده است. مشاهده می‌شود که سطح نانوکامپوزیت‌ها با پوشش نیکل نسبت به بدون پوشش نیکل با تقویت کننده نانو لوله کربنی کاملاً صاف است. این



شکل ۸ سطح سایش آلیاژ پایه مس-روی در: (الف) 5 نیوتن، (ب) 25 نیوتن.



شکل ۹ سطح سایش نانوکامپوزیت با 0.25 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی پوشش داده نشده در (الف) 5 نیوتن، (ب) 25 نیوتن



شکل ۱۰ سطح سایش نانوکامپوزیت با 0.25 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی پوشش داده شده در (الف) 5 نیوتن، (ب) 25 نیوتن

وزنی بدلیل کلوخه ای شدن نانولوله های کربنی در ساختار، سختی کاهش می یابد. این نتایج کاملاً منطبق بر نتایج تست سایش می باشد.

### نتیجه گیری

نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

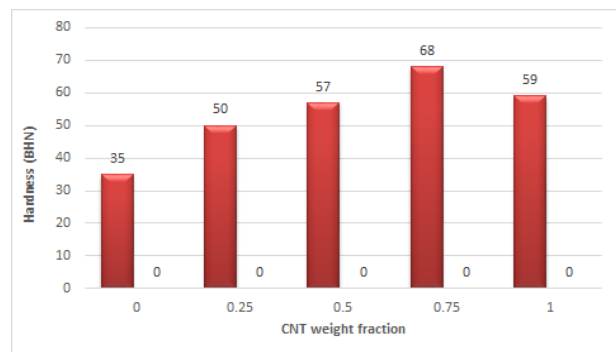
۱. نانوکامپوزیت های مس-روی تقویت شده با نانو لوله های کربنی پوشش داده شده با نیکل و بدون پوشش نیکل، با استفاده از فرآیند اولیه متالورژی پودر به طور موفقیت آمیز تهیه شد و پرس به عنوان فرآیند ثانویه مورد استفاده قرار گرفت.
۲. با افزایش محتوای نانو لوله های کربنی، ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت های مس-روی تقویت شده با نانو لوله های کربنی پوشش داده شده با نیکل و بدون پوشش نیکل کاهش یافت.
۳. کاهش در ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت های مس در مقایسه با آلیاژ پایه مس-روی مربوط به اثر روانکاری نانو لوله های کربنی می باشد.
۴. میزان سایش برای هر دو نانوکامپوزیت تقویت شده با پوشش نیکل و بدون پوشش، با افزایش میزان نانو لوله های کربنی کاهش پیدا کرد. نرخ سایش کم این نانوکامپوزیت ها، به سختی بالا و محدودیت جریان مومسانی توسط نانو لوله های کربنی مربوط می شود.
۵. با افزایش بار از 5 نیوتن به 25 نیوتن و سرعت سایش از 0.3 متر بر ثانیه به 0.9 متر بر ثانیه، نرخ سایش نانوکامپوزیت های مس-روی تقویت شده با نانو لوله های کربنی با پوشش نیکل و بدون پوشش افزایش یافته است.
۶. در بررسی سطوح سایش عواملی مانند چسبندگی، پوسته پوسته شدن و سایش اکسایشی در آلیاژ پایه مس-روی و نانوکامپوزیت های آن تاثیر گذار است.

### تقدیر و تشکر

در نانوکامپوزیت های تقویت شده با نانو لوله هایی با پوشش نیکل 0.25 و 0.75 مشاهده شده است که محصولات سایشی در نانوکامپوزیت های ذکر شده در مقایسه با آلیاژ پایه مس-روی و نانوکامپوزیت هایی با نانولوله های کربنی بدون پوشش بسیار کمتر است. این به سختی زیاد نانوکامپوزیت های مس با تقویت کننده نانو متری با پوشش نیکل مربوط می باشد.

بر روی سطح سایش نمونه تقویت شده با نانولوله های کربنی تشکیل فیلم روان کننده مشاهده شده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ترکیب نانو لوله های کربنی با پوشش نیکل و بدون پوشش، می تواند مقاومت سایشی را در مقایسه آلیاژ پایه مس-روی افزایش دهد [38-43]. نیروهای چسبنده قوی در سطوح تماس موجب تشکیل ناهمواری های برشی و محصولات سایشی در هر دو نانوکامپوزیت شده است.

بدین ترتیب مکانیسم سایشی در نانوکامپوزیت ها عمدتاً دو نوع هستند: اولین مکانیسم غالب، سایش پلاستیکی است، که شامل پوسته پوسته شدن و دومین مکانیسم، سایش چسبنده و حرارتی مانند سایش اکسایشی و تشکیل لایه های اکسیدی می باشد.



شکل ۱۱ سختی نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله های کربنی پوشش داده شده با نیکل در درصد های مختلف نانولوله

شکل (۱۱) نتایج سختی سنجی نمونه های مختلف را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می کنید با افزایش میزان درصد نانولوله های کربنی سختی افزایش یافته است. در ۱ درصد

### مراجع

- [1] F. Rikhtegar, S. Shabestari, H. Saghafian, "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.
- [2] S. Mirzamohammadi, H. Khorsand, M. Aliofkhaezai, "Mechanical behavior of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings electroplated in the presence of organic compounds", *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 245-254, 2017.
- [3] M. Dinulović, B. Rašu, "Dielectric modeling of multiphase composites", *Composite Structures*, Vol. 93, Issue 12, pp. 3209- 3215, 2011.
- [4] Neha Arora, N.N. Sharma, " Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review ", *Diamond and Related Materials*, Vol. 50, pp. 135-150, 2014.
- [5] C.G. Kaufmann, R.Y.S.Zampiva, C.P.Bergmann, A. K.Alves, S.R. Mortari, A.Pavlovic, "Production of multi-wall carbon nanotubes starting from a commercial graphite pencil using an electric arc discharge in aqueous medium", *FME Transactions*, Vol. 46, pp. 151-156, 2018.
- [6] P. J. F.Harris, "Carbon nanotube science", Cambridge University Press, New York, 2009.
- [7] P.W.R.Beaumont, C. Soutis, and A.Hodzic, "Structural integrity and durability of advanced composites: Innovative modelling methods and intelligent design", Elsevier, Cambridge, UK, 2015.
- [8] G.Overney, W.Zhong, D.Tomanek, "Structural rigidity and low-frequency vibrational-modes of long carbon tubules", *Zeitschrift für Physik / D: Atoms, molecules and clusters*, Vol. 27, pp. 93-96, 1993.
- [9] J.P.Lu, "Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes", *Physical Review Letters*, Vol. 79, pp. 1297- 1300, 1997.
- [10] M.M.J.Treacy, T.W.Ebbesen and J.Gibson, "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes", *Nature*, Vol. 381, pp. 678-680, 1996.
- [11] P.G.Koppad, V.K.Singh, C.S.Ramesh, R.G.Koppad and K.T.Kashyap, "*Metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes*", In: Tiwari, A., Shukla, S.K. (Eds.): *Advanced Carbon Materials and Technology*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, pp. 331-376, 2013.
- [12] G.Qianming, Li Dan, L Zhi, Y.Xiao-Su , L.Ji, "Tribology properties of carbon nanotube-reinforced composites, In: Friedrich, K., Schlarb, A.K. (Eds.)", *Tribology and Interface Engineering Series*, Vol. 55, pp. 245-267, 2008.
- [13] H. M.Mallikarjuna, C. S.Ramesh, P. G.Koppad, R.Keshavamurthy and K.T Kashyap, "Effect of carbon nanotube and silicon carbide on microstructure and dry sliding wear behavior of copper hybrid nanocomposites", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 26, pp. 3170-3182, 2016.
- [14] H. M.Mallikarjuna, K. T.Kashyap, P. G Koppad, C. S.Ramesh, R.Keshavamurthy, "Microstructure and dry sliding wear behavior of Cu-Sn alloy reinforced with multiwalled carbon nanotubes", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 26, pp. 1755-1764, 2016.
- [15] P. G.Koppad, K. T.Kashyap, V.Shrathinth, T. A.Shetty, R. G.Koppad, "Microstructure and microhardness of carbon nanotube reinforced copper nanocomposites", *Materials Science and Technology*, Vol. 29, pp. 605-609, 2013.
- [16] P. G.Koppad, H. R.Aniruddha Ram, K. T Kashyap, "On shear-lag and thermal mismatch model in multiwalled carbon nanotube/copper matrix nanocomposites", *Journal of Alloys and Compounds.*, Vol. 549, pp. 82-87, 2013.
- [17] 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", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 580, pp.

527-532, 2013.

- [18] R.George, K. T.Kashyap, R.Rahul, S.Yamdagni, "Strengthening in carbon nanotube/aluminium (CNT/Al) composites", *Scripta Materialia* 53, pp. 1159- 1163, 2005.
- [19] H. R. A.Ram, P. G.Koppad, K. T.Kashyap, "Nanoindentation studies on MWCNT/aluminum alloy 6061 nanocomposites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 559, pp. 920-923, 2013.
- [20] K. T.Kashyap, K. B.Puneeth, A.Ram, P. G.Koppad, "Ageing kinetics in Carbon nanotube reinforced Aluminium alloy AA6063", *Materials Science Forum*, Vol. 710, pp. 780-785, 2012.
- [21] J. P.Tu, Y. Z Yang, L. Y.Wang, X. C.Ma, X. B.Zhang, "Tribological properties of carbon-nanotube- reinforced copper composites", *Tribology Letters*, Vol. 10 pp. 225-228, 2001.
- [22] K. T.Kim, S. I.Cha, S. H.Hong, S. H.Hong, "Microstructures and tensile behavior of carbon nanotubes reinforced Cu matrix nanocomposites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 430, pp. 27-33, 2006.
- [23] Y.A.Sorkhe, H. Aghajani, A.Taghisadeh Tabrizi, "Synthesis and characterisation of Cu–TiO<sub>2</sub> nanocomposite produced by thermochemical process, Powder Metallurgy", *Powder Metallurgy*, pp. 107-111, 2016.
- [24] G.Naseri Azari Golnaz, A.Taghizadeh Tabrizi, , H.Aghajani, "Investigation on corrosion behavior of Cu–TiO<sub>2</sub> nanocomposite synthesized by the use of SHS method", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, Issue 2, pp. 2216-2222, 2019.
- [25] S.A.N.Mehrabani, A.T.Tabrizi, H.Aghajani and H.Pourbagheri, "Corrosion Behavior of SHS-Produced Cu–Ti–B Composites", *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, Vol. 29, No. 3, pp. 167–172, 2020.
- [26] H.Aghajani, M.Roostaei, S.Sharif Javaherian, A.Taghizadeh A.Tabrizi, Abdoli Silabi, N.Farzam Mehr, "Wear behavior of self-propagating high-temperature synthesized Cu-TiO<sub>2</sub> nanocomposites", *Synthesis and Sintering*, Vol. 1, no. 3, pp. 127-134, 2021.
- [27] C.B.Lin, Z.Chang, Y. H.Tunga, K. Ko, "Manufacturing and tribological properties of copper matrix/carbon nanotubes composites", *Wear*, Vol. 270, pp 382-394, 2011.
- [28] Z.Huang, Z.Zheng, S.Zhao, S.Dong, P.Luo, L.Chen, "Copper matrix composites reinforced by aligned carbon nanotubes: Mechanical and tribological properties", *Materials and Design*, Vol. 133, pp 570-578, 2017.
- [29] E.Dujardin, T. W.Ebbesen, H.Hiura and K.Taigaki, "Capillarity and wetting of carbon nanotubes", *Science*, Vol. 265, pp 1850-1852, 1994.
- [30] K.Rajkumar, S.Aravindan, "Tribological characteristics of copper-nano carbon crystalline composites", In: *Tyagi, R., Davim, J.P. (Eds.): Processing techniques and tribological behaviour of composite materials. IGI Global, Hershey*, pp. 107-125, 2015.
- [31] P.Manikandan, R.Sieh, A.Elayaperumal, H. R.Le, S. Basu, "Micro/Nanostructure and tribological characteristics of pressureless sintered carbon nanotubes reinforced aluminium matrix composites", *Journal of Nanomaterials*, Article ID 9843019, 2016.
- [32] K. Rajkumar, S. Aravindan., "Tribological performance of microwave sintered copper–TiC–graphite hybrid composites", *Tribology International*, Vol. 44, no. 4, PP. 347-358, 2011.

- [33] C. S.Ramesh, N.Ahmed, M. A.Mujeebu, M. Z.Abdullah, "Development and performance analysis of novel cast copper–SiC–Gr hybrid composites", *Materials and Design*, Vol. 30(6), pp. 1957-1965, 2009.
- [34] C. A. V.Kumar, J. S.Rajadurai, "Influence of rutile (TiO<sub>2</sub>) content on wear and microhardness characteristics of aluminium-based hybrid composites synthesized by powder metallurgy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, pp 63-73, 2016.
- [35] G.Gautam, N Kumar, A.Mohan, R. K.Gautam, S.Mohan, "Tribology and surface topography of tri-aluminide reinforced composites", *Tribology International*, Vol. 97, pp 49-58, 2016.
- [36] H. M.Mallikarjuna, C. S.Ramesh, P. G.Koppad, R. Keshavamurthy, K. T. Kashyap, "Effect of carbon nanotube and silicon carbide on microstructure and dry sliding wear behavior of copper hybrid nanocomposites", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, pp 3170-3182, 2016.
- [37] Jalal Jafari, Mohammad Kazem Besharati Givi & Mohsen Barmouz, " Mechanical and microstructural characterization of Cu/CNT nanocomposite layers fabricated via friction stir processing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78, pp. 199-209, 2015.
- [38] M.Ruiz-Andrés, A.Conde, de J.,Damborenea, I.García, "Wear behavior of aluminum alloys at slow sliding speeds", *Tribology Transactions*, Vol. 58, pp. 955-962, 2015.
- [39] K. R.Kumar, K. M.Mohanasundaram, G.Arumaikkannu, R.Subramanian, "Analysis of parameters influencing wear and frictional behavior of aluminum–fly ash composites", *Tribology Transactions*, Vol. 55, pp 723-729, 2012.
- [40] K.Rajkumar, S.Aravindan, "Tribological studies on microwave sintered copper carbon nanotube composites", *Wear*, Vol. 270, pp 613-621, 2011.
- [41] B.Chen, J.Yang, Q Zhang, H.Huang, H. Li, H.Tang, C.Li, "Tribological properties of copper-based composites with copper coated NbSe<sub>2</sub> and CNT", *Materials and Design*, Vol. 75, pp. 24-31, 2015.
- [42] C. H Guiderdoni, C.Estournes, A.Peigney, A. Weibel, V.Turq, C. H.Laurent, "The preparation of double-walled carbon nanotube/Cu composites by spark plasma sintering and their hardness and friction properties", *Carbon*, Vol. 49, pp 4535-4543, 2011.
- [43] S. R.Dong, J. P.Tu, X. B.Zhang, "An investigation of the sliding wear behavior of Cu-matrix composite reinforced by carbon nanotubes", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 313, pp 83-87, 2001.

