

# ارزیابی سختی و رفتار تریبولوژیکی پوشش هیبریدی Ni-B<sub>4</sub>C-WS<sub>2</sub> تولید شده با آبکاری الکتریکی

پیمان علی‌زاده بروجنی، بهنام لطفی، زهره صادقیان

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دریافت مقاله: ۹۸/۰۷/۲۹ - پذیرش مقاله: ۹۹/۰۲/۰۶)

چکیده

هدف از این پژوهش هم‌رسوبی الکتریکی ذرات سخت کاربید بور (B<sub>4</sub>C) و ذرات روانکار سولفید تنگستن (WS<sub>2</sub>) بر زیر لایه مسی و ایجاد پوشش نانو کامپوزیتی Ni-B<sub>4</sub>C-WS<sub>2</sub> و ارزیابی سختی و رفتار تریبولوژیکی پوشش نانو کامپوزیتی حاصل بوده است. جهت بررسی ریزساختاری از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدان (FESEM) و جهت ارزیابی سختی و رفتار تریبولوژیکی به ترتیب از سختی سنج ویکرز و آزمون پین روی دیسک استفاده شد. نتایج نشان داد که پوشش کامپوزیتی هیبریدی نسبت به پوشش‌های کامپوزیتی تک ذره‌ای ریز دانه‌تر بوده و توزیع بهتری از ذرات کاربید بور و سولفید تنگستن دارد. سختی پوشش هیبریدی ۴۶۱ ویکرز به دست آمد که نسبت به دو پوشش دیگر سختی بالاتری دارد. همچنین کمترین کاهش وزن پس از آزمون سایش به مسافت لغزش ۸۰۰ متر در پوشش هیبریدی به میزان ۱ میلی گرم به دست آمد که نسبت به دو پوشش دیگر پایین‌تر بود. همچنین کمترین ضریب اصطکاک برای پوشش هیبریدی به میزان ۰/۵۳ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: کاربید بور، سولفید تنگستن، پوشش هیبریدی، سختی، سایش، ضریب اصطکاک.

## Evaluation of Hardness and Tribological Behavior of Ni-B<sub>4</sub>C-WS<sub>2</sub> Hybrid Coating Fabricated by Electrodeposition

Peyman Alizadeh Boroujeni, Behnam Lotfi, Zohreh Sadeghian

Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

(Received 21 October 2019, accepted 25 April 2020)

### Abstract

The purpose of this study was the co-electrodeposition of boron carbide (B<sub>4</sub>C) hard particles and tungsten sulfide (WS<sub>2</sub>) lubricant particles on copper substrate and produce Ni-B<sub>4</sub>C-WS<sub>2</sub> nanocomposite coatings. Hardness and tribological behavior of nanocomposite coatings were also investigated. Field emission electron microscopy (FESEM) was used to study the microstructure of coatings and hardness and tribological behavior, were evaluated by microhardness and pin-on-disk tests respectively. The results showed that hybrid nanocomposite coating is more fine-grained than other coatings, and have a better distribution of boron carbide and tungsten sulfide particles. The hardness of hybrid coating was obtained 461 vickers, which was much higher than that of the other two coatings. The lowest weight loss after wear test at slide distance of 800 m was obtained in 1 mg hybrid coating which was much lower than other two coatings. Also, the lowest friction coefficient for the hybrid coating was 0.53.

**Keywords:** Boron Carbide, Tungsten Sulfide, hybrid coating, hardness, wear, friction coefficient.

**E-mail of Corresponding author:** behnaml@yahoo.com.

هدایت حرارتی ویژه ( $1/5 \times 10^{-3} \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) از جمله ویژگی‌های برجسته این ماده سرامیکی می‌باشد [۸]. در رسوب‌دهی الکتریکی، هدایت الکتریکی بالای ذرات B<sub>4</sub>C باعث هم‌رسوبی بهتر و خاصیت آب‌گریزی آن سبب کاهش هم‌رسوبی این ذرات می‌شود [۹]. علاوه بر ذرات سخت، ذرات روانکار مختلفی از جمله WS<sub>2</sub>، MoS<sub>2</sub>، PTFE<sup>۶</sup>، گرافیت، BN هگزائگونالی و WS<sub>2</sub> به زمینه پوشش افزوده می‌شود تا در دمای معمولی و یا در دماهای بالا منجر به بهبود خاصیت روانکاری و کاهش ضریب اصطکاک گردد [۲]. سولفید تنگستن (WS<sub>2</sub>) ساختمان کریستالی هگزائگونال و مشابه با ساختمان گرافیت دارد و دارای خواص روانکاری می‌باشد به طوری که چنانچه سطح تماسی موازی با صفحات لایه‌ها حرکت کند، پیوندهای واندروالسی ضعیف بین لایه‌ها به آسانی شکسته شده و در نتیجه لایه بالایی نسبت به لایه پایینی به آسانی حرکت می‌کند [۱۰]. در میان تمام روانکارهای سولفیدی، سولفید تنگستن بهترین روانکاری خشک را از خود نشان می‌دهد. (ضریب اصطکاک دینامیکی تقریباً ۰/۰۳ و ضریب اصطکاک استاتیکی تقریبی ۰/۰۷) [۱۱]. در پوشش‌های آبکاری هیبریدی، به جای یک نوع فاز تقویت کننده با انتخاب یک یا چند ذره سخت و یک یا چند ذره روانکار می‌توان سختی و مقاومت سایشی و قابلیت روانکاری پوشش را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داد [۱۲]. در رابطه با آبکاری پوشش‌های هیبریدی، به خصوص استفاده همزمان از یک ذره سخت و یک ذره روانکار، تحقیقات محدودی صورت پذیرفته است. بعنوان مثال در تحقیقی پوشش کامپوزیتی Ni-BN-B<sub>4</sub>C بر زیرلایه مسی اعمال شده و حضور میکروذرات B<sub>4</sub>C و BN در پوشش منجر به افزایش سختی و مقاومت سایشی در مقایسه با پوشش نیکلی و کاهش ضریب اصطکاک به دلیل حضور ذرات با ساختار لایه‌ای و هگزائگونالی BN شده است [۸]. همچنین

پوشش لایه محافظی است که بر روی سطحی که زیرلایه نامیده می‌شود جهت بهبود خواص سطحی آن از جمله سختی، مقاومت سایشی و مقاومت به خوردگی اعمال می‌شود. از روش‌های پوشش‌دهی می‌توان اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی<sup>۱</sup>، الکترولس<sup>۲</sup>، رسوب فیزیکی بخار<sup>۳</sup>، رسوب شیمیایی بخار<sup>۴</sup> و آبکاری الکتریکی<sup>۵</sup> را نام برد. آبکاری الکتریکی یا رسوب‌دهی الکتریکی یکی از مهم‌ترین، ساده‌ترین و ارزان‌ترین فرایندهای پوشش‌دهی برای ایجاد یک پوشش مترآم و یکنواخت بر روی سطح یک زیرلایه فلزی به وسیله اعمال جریان الکتریکی می‌باشد [۱]. نیکل یکی از رایج‌ترین فلزات مورد استفاده جهت ایجاد پوشش توسط فرایند آبکاری الکتریکی می‌باشد [۲]. آبکاری نیکل یکی از کارآمدترین روش‌های پوشش‌دهی است که کاربردهایی از مصارف تزئینی تا صنعتی را دربر گرفته است [۳]. هنگامی که یک حمام آبکاری به صورت سوسپانسیونی از ذرات تقویت کننده باشد، پوششی حاوی این ذرات بر روی زیرلایه ایجاد می‌شود که این پوشش، پوشش کامپوزیتی نامیده می‌شود [۴]. دستیابی به نانو ذرات در اواخر دهه ۱۹۹۰ تمایل به تولید پوشش‌های نانوکامپوزیتی زمینه نیکلی را افزایش داد [۵]. در صورتی که در پوشش از ذرات تقویت کننده سرامیکی سخت مانند WC، SiO<sub>2</sub>، TiO<sub>2</sub>، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، SiC، WS<sub>2</sub> و B<sub>4</sub>C استفاده شود، می‌توان سختی و مقاومت به سایش پوشش کامپوزیتی را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داد [۶]. کاربرد بور (B<sub>4</sub>C) پس از الماس و BN مکعبی، سومین ماده سخت شناخته شده در طبیعت می‌باشد [۷]. سختی بالا ( $HV > 30 \text{ GP}$ )، مقاومت به سایش بالا، دمای ذوب بالا ( $2450^\circ\text{C}$ )، چگالی پایین ( $2/52 \text{ g.cm}^{-3}$ )،

<sup>1</sup> Plasma Electrolytic Oxidation

<sup>2</sup> Electroless

<sup>3</sup> Physical Vapor Deposition (PVD)

<sup>4</sup> Chemical Vapor Deposition (CVD)

<sup>5</sup> Electroplating

<sup>6</sup> Polytetrafluoroethylene

جدول ۱. ترکیب شیمیایی حمام واتس

مقدار)	نوع ماده
(g/l)	
۳۳۰	سولفات نیکل
۳۰	کلرید نیکل
۳۰	اسید بوریک

به منظور جلوگیری از آگلومره شدن ذرات از سدیم دودسیل سولفات<sup>۱</sup> SDS استفاده شد. شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدان (FESEM) از دو نانو پودر کاربرد بور و سولفید تنگستن استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

به منظور آماده سازی زیرلایه‌های مسی ابتدا سنباده زنی با استفاده از سنباده‌های ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ انجام شد. سپس به منظور چربی زدایی، هر نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در محلول استون شستشو داده شد. سپس جهت پوشش‌دهی تنها روی یک سطح نمونه، پشت نمونه با چسب پلی اتیلنی پوشانده شد. به منظور زدودن اکسیدهای سطحی، هر نمونه داخل محلول ۱۰ درصد  $H_2SO_4$  به مدت یک دقیقه قرار گرفت. سپس جهت جلوگیری از اکسیداسیون، به سرعت درون یک بشر ۴۰۰ سی سی حاوی ۲۰۰ سی سی محلول واتس از پیش گرم شده تا دمای  $50^{\circ}C$  قرار گرفت. در بین هر مرحله برای شستن نمونه از آب مقطر استفاده شد. نمونه‌های مسی به عنوان کاتد و صفحه نیکلی به عنوان آند به صورت افقی و موازی با هم و به فاصله ۵ cm از یکدیگر به ترتیب به قطب منفی و مثبت منبع تغذیه متصل شد. جهت توزیع یکنواخت نانو ذرات سولفید تنگستن در حمام آبکاری از همزن آلتراسونیک استفاده شد. بدین منظور قبل از پوشش دهی، ذرات به مدت یک ساعت درون همزن آلتراسونیک پروب دار قرار گرفتند.

پوشش نانوکامپوزیتی  $Ni-WC-WS_2$  فوق آب‌گریز با غلظت‌های مختلف ذرات مورد بررسی قرار گرفته و گزارش شده که پوشش هیبریدی نسبت به پوشش‌های تک‌ذره‌ای از تراکم بالاتر و ساختار ریزدانه‌تری برخوردار است [۱۳]. در پژوهش حاضر هدف تولید پوشش با سطح مقاوم به سایش توسط رسوب‌دهی همزمان پوشش  $Ni-B_4C-WS_2$  بوده است. نانوذرات  $WS_2$  به‌عنوان جامد خودروانکار می‌تواند بطور قابل-توجهی ضریب اصطکاک بین سطوح جامد-جامد را کاهش دهد و نانوذرات  $B_4C$  نیز مقاومت به سایش را افزایش دهد و به دلیل خاصیت آبگریزی میزان تخلخل در پوشش کاهش یابد. انتظار می‌رود تلفیق این دو نوع ذره حداکثر مقاومت سایشی را تضمین کند. تاثیر غلظت نانوذرات در محلول آبکاری بر ریزساختار، سختی و رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های نانوکامپوزیتی بررسی شده است.

#### مواد و روش‌ها

زیر لایه‌هایی از جنس مس خالص با خلوص ۹۹/۹٪ با ابعاد  $40 \times 40 \times 0.5 \text{ mm}^3$  به عنوان کاتد و یک قطعه نیکل خالص با خلوص ۹۹/۹٪ با ابعاد تقریبی  $\text{mm}^3$   $50 \times 40 \times 0.5$  به عنوان آند انتخاب شد. حمام واتس با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۱-۳ به عنوان الکترولیت انتخاب شد. نانو ذرات کاربرد بور با میانگین اندازه ذرات ۶۰ نانومتر تهیه شده از شرکت نوترینو با خلوص ۹۹/۹٪ و نانو ذرات سولفید تنگستن با میانگین اندازه ذرات ۳۰ نانومتر و درصد خلوص ۹۹/۹٪ تهیه شده از شرکت پتروپلاستیک به عنوان ذرات تقویت شونده استفاده شد. در کد گذاری پوشش‌ها از نماد  $Ni-xB_4C-yWS_2$  استفاده شده که در آن x و y به ترتیب بیان‌گر غلظت ذرات کاربرد بور و غلظت ذرات سولفید تنگستن اضافه شده بر حسب g/l به حمام آبکاری می‌باشد.

<sup>1</sup> Sodium Dodecyl Sulfate

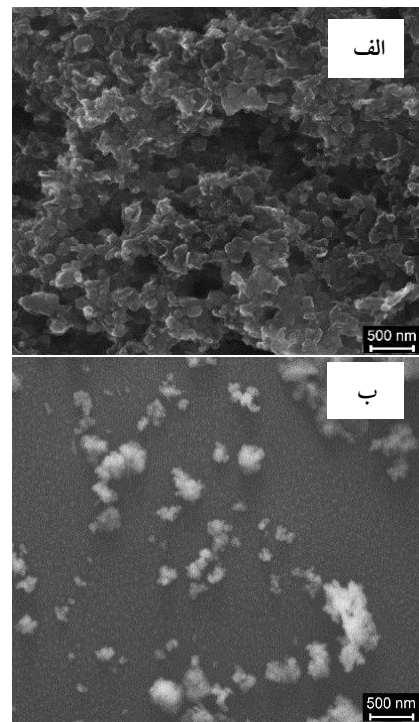
بررسی رفتار تریبولوژیکی نمونه‌ها از آزمون پین روی دیسک استفاده شد. جهت انجام این آزمون از دستگاه سایش TSN-WTH-01 ساخت شرکت تجهیز صنعت طبق استاندارد ASTM G99 استفاده شد. بدین منظور از نمونه‌های مربعی آماده شده، دایره‌ای به قطر ۴۰ میلی‌متر روی دیسک فلزی از قبل آماده شده، بریده شد. آزمون سایش در مسافت ۸۰۰ متر به وسیله پین فولادی به شعاع ۵ میلی‌متر با سختی ۶۰RC تحت بار ۵N و سرعت چرخش دیسک ۱۰۰rpm به شعاع سایش ۱۵ میلی‌متر انجام شد. وزن از دست رفته پس از آزمون با ترازوی با دقت هزارم گرم اندازه گیری شد.

### نتایج و بحث

#### مورفولوژی سطحی

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدان از پوشش‌های تک ذره‌ای و هیبریدی حاوی مقادیر مختلف غلظت نانو ذرات در حمام آبکاری و شکل ۳ آنالیز نقطه‌ای EDS از سطح هر کدام از پوشش‌ها را نشان می‌دهد.

مهمترین عامل در تعیین خواص پوشش‌های نانوکامپوزیتی، مقدار و نحوه توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه پوشش‌های کامپوزیتی می‌باشد. پوشش هیبریدی (شکل ۲-ج) نسبت به پوشش‌های تک ذره‌ای (شکل‌های ۲-الف و ۲-ب) سطح صاف‌تر و با ناهمواری‌های کمتری داشته و به نظر می‌رسد توزیع بهتری از ذرات در آن وجود دارد. در واقع می‌توان گفت به علت اختلاف مقاومت الکتریکی زیاد بین زمینه نیکل و ذرات  $WS_2$  و ذرات  $B_4C$ ، توزیع جریان بالایی در اطراف ذرات ایجاد شده و در نتیجه، سطح پوشش‌های تک ذره‌ای زبر و خشن خواهد شد.



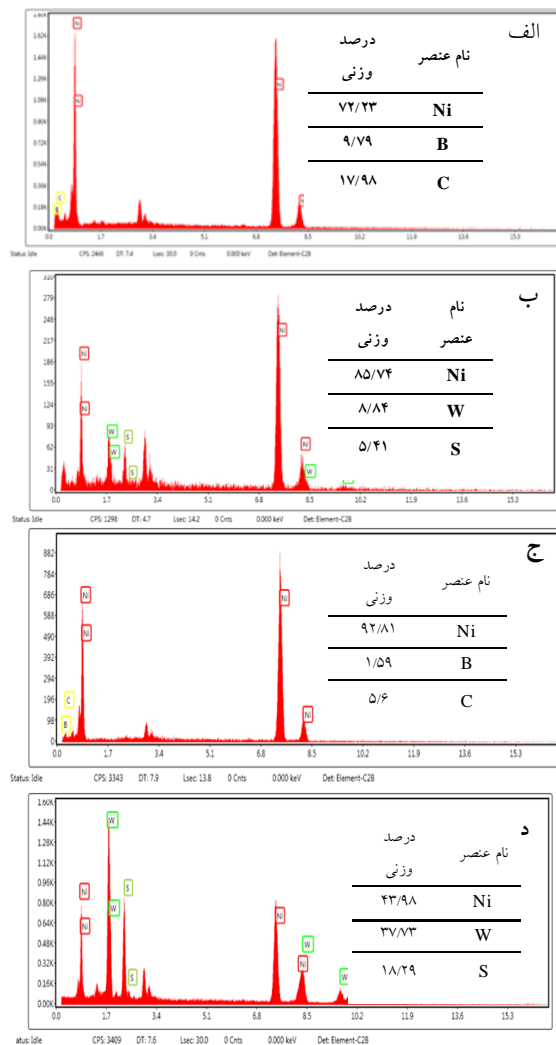
شکل ۱. تصویر FESEM از الف) نانو ذرات کاربرد بور و

ب) نانو ذرات سولفید تنگستن

در حین پوشش دهی از همزن آلتراسونیک حمامی و همزن مکانیکی به طور همزمان استفاده شد. پوشش دهی توسط جریان پالسی انجام پذیرفت. مدت زمان روشن ۴ و مدت زمان خاموشی ۱ میلی ثانیه در نظر گرفته شد. بنابراین فاکتور وظیفه ۰/۸ و فرکانس پالس ۲۰۰HZ به دست آمد. مدت زمان پوشش دهی نیز ۶۵ دقیقه در نظر گرفته شد.

جهت بررسی مورفولوژی سطحی از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدان (FESEM) مدل QUANTA 200 ساخت کشور آمریکا استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی با استفاده از سیگنال الکترون‌های ثانویه با فاصله کاری ۱۴/۶ mm و ولتاژ ۱۰ kV تهیه شد. آزمون سختی با استفاده از ریزسختی سنج اینووا ساخت شرکت ایسوس انجام شد. بار انتخاب شده در هر نمونه ۵۰ گرم و مدت توقف بار ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد. در هر نمونه میانگین سختی در سه نقطه مختلف برای میزان سختی گزارش شد. به منظور

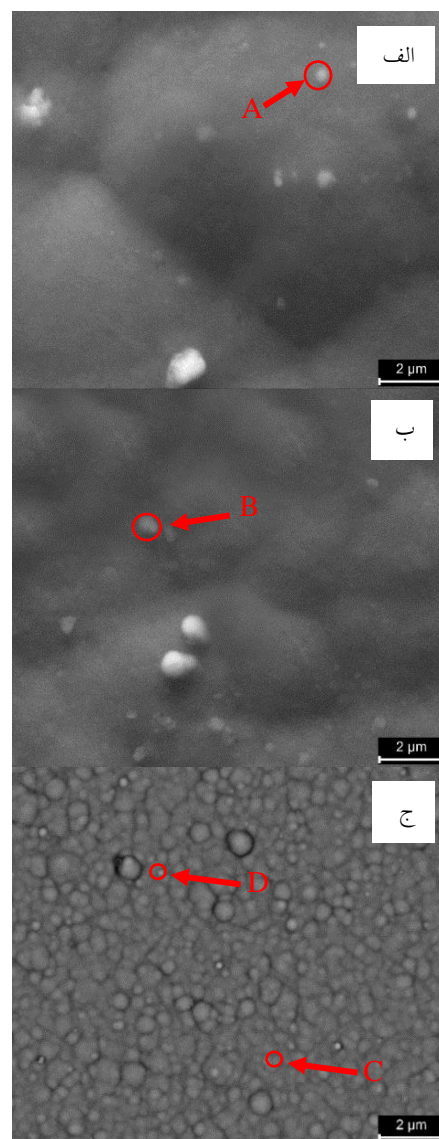
شکل ۳ آنالیز نقطه‌ای EDS از سطح پوشش‌های نشان داده شده در شکل ۱ را نشان می‌دهد.



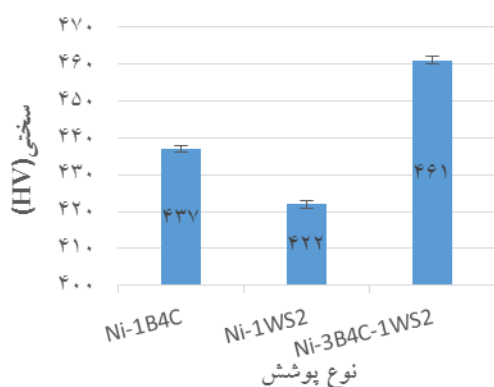
شکل ۳. آنالیز نقطه‌ای EDS در نقاط مشخص شده شکل ۱ (الف) A، (ب) B، (ج) C و (د) D

آنالیز نقطه A حضور دو عنصر کربن و بور و در نتیجه وجود ذرات کاربید بور در زمینه نیکل و آنالیز نقطه B حضور دو عنصر تنگستن و گوگرد و در نتیجه وجود ذرات سولفید تنگستن در زمینه نیکل را به اثبات می‌رساند. آنالیز نقطه C وجود عناصر کربن و بور توزیع شده در زمینه نیکل را نشان می‌دهد. پس می‌توان انتظار داشت ذرات تیره‌تر در زمینه ذرات کاربید بور باشند. آنالیز نقطه D وجود دو عنصر گوگرد و تنگستن در زمینه

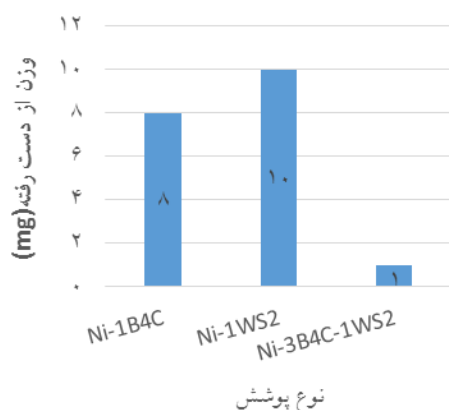
اما در پوشش‌های هیبریدی به علت درگیر شدن این زبری‌ها با یکدیگر، این سطح خشن تا حدی از بین رفته و یک مرفولوژی هموارتر و دانه ریزتری را ایجاد کرده است. این موضوع توسط محققینی که پوشش هیبریدی  $\text{Ni-WC-WS}_2$  را مورد بررسی قرار داده‌اند مشاهده شده است [۱۳].



شکل ۲. تصاویر FESEM از سطح پوشش‌های الف)  $\text{Ni-1B}_4\text{C}$  (ب)  $\text{Ni-1WS}_2$  و ج)  $\text{Ni-3B}_4\text{C-1WS}_2$



شکل ۴. مقایسه سختی پوشش‌های تک ذره‌ای و هیبریدی.



شکل ۵. مقایسه وزن از دست رفته پوشش‌های تک ذره‌ای و هیبریدی پس از لغزش ۸۰۰ متر.

شکل ۶ تصاویر SEM از سطح سایش پوشش‌های تک ذره‌ای و هیبریدی را نشان می‌دهد. در شکل ۶-الف که مربوط به پوشش  $Ni-1B_4C$  می‌باشد، خطوط سایش تا حدودی موازی با مسیر سایش در سطح سایش دیده می‌شود. آثار تغییر شکل پلاستیک و نواحی انباشته شده نیز در سطح سایش موید مکانیزم خیش ریز در سطح سایش می‌باشد. این آثار نشان دهنده مکانیزم سایش خراشان می‌باشد [۱۶]. شکل ۶-ب مربوط به پوشش  $Ni-1WS_2$  می‌باشد. در این تصویر نیز لهیدگی‌ها و آثار تغییر شکل پلاستیک بسیاری به وضوح دیده می‌شوند و همان‌گونه که دیده می‌شود آثاری از خراش‌ها وجود ندارد. طبق گفته‌های پیشین می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم سایش در این پوشش غالباً مکانیزم سایش چسبان بوده است.

نیکل را نشان می‌دهد پس می‌توان ذرات روشن‌تر در زمینه را ذرات سولفید تنگستن در نظر گرفت.

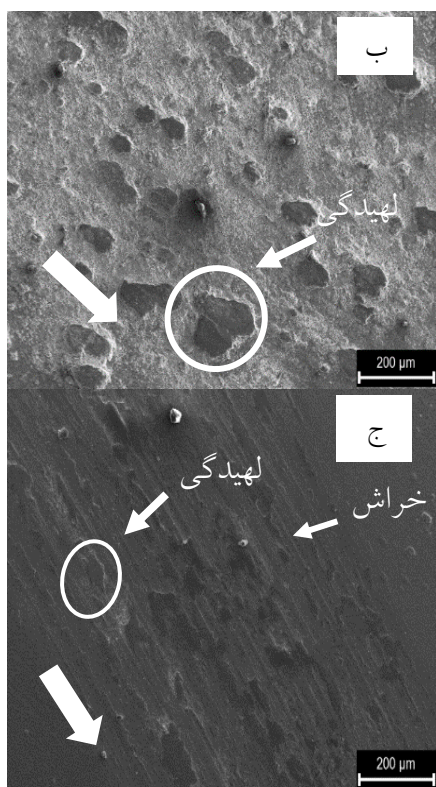
### سختی

تغییرات ریزسختی برای پوشش‌های تک ذره‌ای و هیبریدی در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به ماهیت نرمی ذرات سولفید تنگستن، این پوشش نسبت به پوشش حاوی ذرات کاربید بور از سختی پایین‌تری برخوردار است. اما همان‌گونه که مشاهده می‌شود پوشش هیبریدی نسبت به دو پوشش تک ذره‌ای از سختی بالاتری برخوردار است. همان‌گونه که گفته شد پوشش‌های هیبریدی، نواحی گل کلمی ریزتری که آن را طبق تحقیقات پیشین می‌توان به کوچکتر شدن دانه‌ها ربط داد [۱۴]. حضور دانه‌های کوچکتر افزایش مرز دانه را به دنبال دارد و چون مرز دانه یکی از موانع حرکت نابجایی‌ها می‌باشد، باعث افزایش سختی می‌گردد.

### مقاومت سایشی

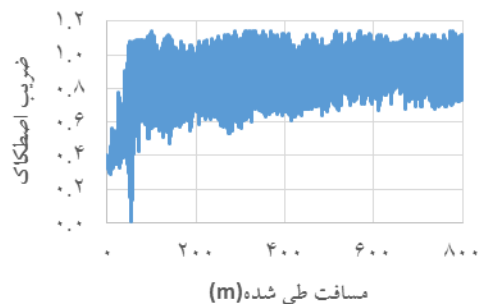
شکل ۵ مقادیر وزن از دست رفته برای پوشش‌های تک ذره‌ای و هیبریدی پس از طی لغزش ۸۰۰ متر را نشان می‌دهد. میزان وزن از دست رفته برای پوشش هیبریدی بسیار پایین‌تر از پوشش‌های تک ذره‌ای گزارش شده است. کاهش وزن از دست رفته به معنای افزایش مقاومت سایشی می‌باشد. مطابق قانون آرچارد<sup>۱</sup> سختی با نرخ سایش رابطه عکس دارد. سختی بالاتر منجر به نرخ سایش پایین‌تر و مقاومت سایشی بالاتر شده است [۱۵]. بنابراین مقاومت به سایش پوشش  $Ni-1B_4C$  بالاتر از پوشش  $Ni-1WS_2$  و مقاومت به سایش پوشش  $Ni-3B_4C-1WS_2$  بالاتر از هر دو پوشش دیگر می‌باشد.

<sup>۱</sup> Archard



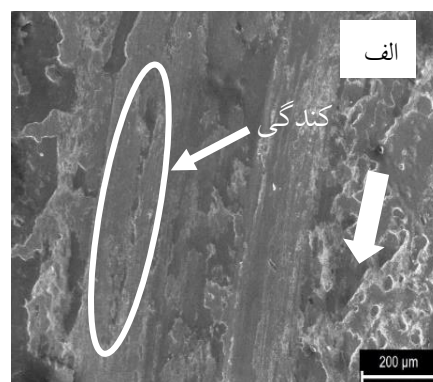
شکل ۶. تصاویر SEM از سطوح سایش پوشش‌های الف) Ni- $\text{B}_4\text{C}$ ، ب)  $\text{Ni-1WS}_2$  و ج)  $\text{Ni-3B}_4\text{C-1WS}_2$  پس از طی مسافت لغزش ۸۰۰ متر (جهت پیکان راستای سایش را نشان می‌دهد).

شکل ۸ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای پوشش تک ذره‌ای  $\text{Ni-WS}_2$  را نشان می‌دهد. ضریب اصطکاک از یک مقدار بسیار پایین به طور منظم افزایش پیدا کرده و به یک مقدار تقریبی ثابتی رسیده است.

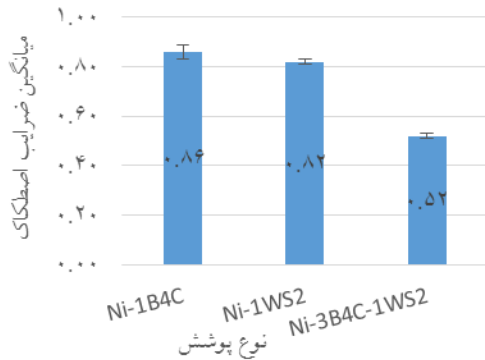


شکل ۷. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای پوشش  $\text{Ni-1B}_4\text{C}$  پس از لغزش ۸۰۰ متر.

شکل ۶-ج مربوط به پوشش هیبریدی  $\text{Ni-1WS}_2-3\text{B}_4\text{C}$  می‌باشد. به نظر می‌رسد که در طی لغزش پس از یک دوره کوتاه، نانو ذرات می‌توانند از زمینه خارج شوند و همراه با ساچمه فولادی در طی سایش حرکت کنند و به عنوان ذره ساینده بین سطوح درگیر موجب سایش خراشان شوند. خیش زدگی‌ها و شیارهای موجود در سطح سایش نشان دهنده مکانیزم سایش خراشان است. در این تصویر با توجه به زیادتر بودن آثار مکانیزم سایش خراشان نسبت به آثار مکانیزم سایش چسبان می‌توان مکانیزم غالب را مکانیزم سایش خراشان در نظر گرفت [۱۷ و ۱۸]. شکل ۷ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای پوشش تک ذره‌ای  $\text{Ni-B}_4\text{C}$  را نشان می‌دهد. ضریب اصطکاک پایین در شروع سایش ناشی از تشکیل لایه اکسیدی و آلودگی‌های طبیعی سطح می‌باشد. با افزایش مسافت لغزش، آلودگی‌ها برطرف شده و یک سطح پولیش شده حاصل می‌شود اما به علت به دام افتادن ذرات سایشی بین سطوح تماس، ضریب اصطکاک به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. با ادامه فرایند لغزش به علت ثابت ماندن تعداد ذرات به دام افتاده بین دو سطح، این بیشینه ضریب اصطکاک تقریباً ثابت باقی می‌ماند [۱۹].



پوشش، در مقایسه با پوشش‌های تک ذره‌ای عنوان نمود  
 [۲۰].



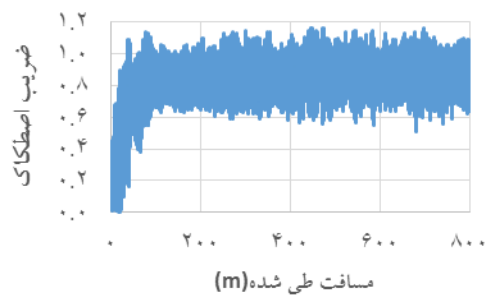
شکل ۱۰. میانگین ضرایب اصطکاک پوشش‌های تک ذره‌ای و هیبریدی.

### نتیجه گیری

پوشش هیبریدی نسبت به پوشش‌های تک ذره‌ای مورفولوژی ریزدانه‌تر و ساختار یکنواخت‌تری نشان داد. همچنین بالاترین سختی و کمترین میزان وزن از دست رفته در اثر سایش در بین پوشش‌های تک ذره‌ای و هیبریدی برای پوشش هیبریدی به ترتیب به میزان ۴۶۱ ویکرز و ۱ میلی گرم به دست آمد. پایین‌ترین ضریب اصطکاک نیز برای پوشش هیبریدی به میزان ۰/۵۳ به دست آمد. علت بهبود خواص پوشش هیبریدی را می‌توان به مقدار و توزیع بیشتر ذرات تقویت کننده در پوشش هیبریدی نسبت به پوشش‌های تک ذره‌ای مربوط دانست.

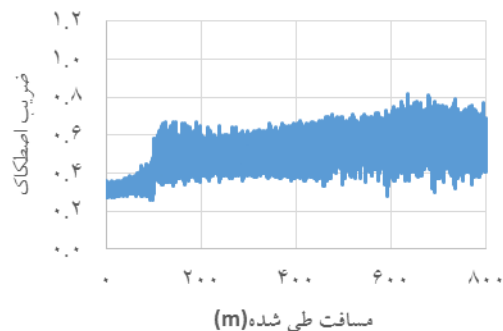
### مراجع

1. K.H.Hou and Y.C.Chen. *Preparation and wear resistance of pulse electrodeposited Ni-W/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings*. Applied Surface Science. 257(2011) 6340-6346.
2. M.Cames. *A stable tetraalkyl complex of nickel (IV)*. German Chemical Society. 48(2009) 290-294.
3. S.Kumar. S.Pande and P.Verma. *Factor effecting electrodeposition processes*.



شکل ۸. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای پوشش Ni-1WS<sub>2</sub> پس از لغزش ۸۰۰ متر.

شکل ۹ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای پوشش هیبریدی  $Ni-3B_4C-1WS_2$  را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص می‌باشد ضریب اصطکاک از مقدار ۰/۳ شروع شده و به یک مقدار ثابتی رسیده است. ثابت بودن نمودار و عدم نوسانات زیاد را می‌توان به دلیل وجود مکانیزم سایش خراشان در نظر گرفت.



شکل ۹. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای پوشش Ni-3B<sub>4</sub>C-1WS<sub>2</sub> پس از لغزش ۸۰۰ متر.

در شکل ۱۰ میانگین ضرایب اصطکاک پوشش‌های تک ذره‌ای و هیبریدی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشخص است که پوشش حاوی ذرات سولفید تنگستن به دلیل ماهیت روانکاری، نسبت به پوشش حاوی ذرات کاربید بور از ضریب اصطکاک پایین‌تری برخوردار است [۱۰]. همچنین پوشش هیبریدی میانگین ضریب اصطکاک ۰/۵۳ را از خود نشان داده که دلیل آن را می‌توان بالاتر بودن مقادیر ذرات تقویت کننده و توزیع یکنواخت آن‌ها در



- resistance. Applied Surface Science. 487(2019) 1329-1340.
14. C.Hu and C.Wu. *Effect of deposition modes on the microstructure of copper deposits from an acidic sulfate bath*. Surface and Coating Technology. 176(2003) 75-83.
15. J.Archard. *Contact and rubbing of flat surfaces*. Journal of Applied Physics. 24(1953) 981-988.
16. A.Mussa. *Wear characterization and wear mapping of a coated cutting tool*. Msc Thesis. Karlstad University, 2015.
17. S.Dehgahi. R.Amini. M.Alizadeh. *Corrosion, passivation and wear behaviors of electrodeposited  $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$  nano-composite coatings*. Surface and Coatings Technology. 304(2016) 502-511.
18. G.W.Stachowiak. *Wear – materials, mechanisms and practice*, John Wiley & Sons Ltd, 2006.
19. H. M.feng. H.W.bin. Z. Cheng. W. J.fei. SH. Bin and W. Y.Ting State. *Effect of wear conditions on tribological properties of electrolessly-deposited  $\text{Ni-P-Gr-SiC}$  hybrid composite coating*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 22(2012) 2586-2592.
20. S.Imanian Ghazanlou. A.H.S.Farhood. S. Hosouli. S. Ahmadiyeh and A. Rasooli. *Pulse and direct electrodeposition of  $\text{Ni-Co/micro}$  and nanosized  $\text{SiO}_2$  particles*. Materials and Manufacturing Processes. 33(2018) 1067-1079.
- International Journal of Current Engineering and Technology. 5(2015) 543-549.
4. T.Tsubota. S.Tanii. T.Ishida. M.Nagata and Y.Matsumoto. *Composition electroplating of Ni and surface-modified diamond particles with silane coupling reagent*. Diamond and Related Materials. 14(2005) 608-612.
5. M.R.Vaezi. S.K.sadrnezhaad and L.Nikzad. *Electrodeposition of  $\text{Ni-SiC}$  nano composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics*. Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 315(2008)176-182.
6. H.Zhu. Y.Niu. C.Lin. L.Huang. H.Ji and X.Zheng. *Microstructures and tribological properties of vacuum plasma spray  $\text{B}_4\text{C-Ni}$  composite coatings*. Ceramics Internationals. 39(2013)101-110.
7. J.Houshka. P.steidl. J.Vlcek and J. Martan. *Thermal, mechanical and electrical properties of hard  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{BCN}$ ,  $\text{ZrBC}$  and  $\text{ZrBCN}$  ceramics*. Ceramics Internationals. 42(2016) 4361-4369.
8. S.Paydar. A.Jafari. M.E.Bahrololoom and V. Mozafari. *Influence of  $\text{BN}$  and  $\text{B}_4\text{C}$  particulates on wear and corrosion resistance of electroplated nickel matrix composite coatings*. Tribology – Materials. Surfaces & Interfaces. 9(2015) 105-110.
9. J.E. Zorzi.C.A. Perottoni and J.A.H.Dajornada. *Hardness and wear resistance of  $\text{B}_4\text{C}$  ceramics prepared with several additives*. Material Letters 59(2005) 2932-2935.
10. R.Greenberg. R. Halperin and G. Etsion. I. Tenne. *The effect of  $\text{WS}_2$  nanoparticles on friction reduction in various lubrication regimes*. Tribology Letters 17(2004)179-176.
11. D.Roy. A.K.Das. R.Saini. P.K.Singh. P.Kumar. M.Hussain. A.Mandal and A.R.Dixit. *Pulse current co-deposition of  $\text{Ni-WS}_2$  nano-composite film for solid lubrication*. Materials and Manufacturing Processes. 32(2017) 365-372.
12. Z.Jia and D.sheng Xiong.  *$\text{MoS}_2$  coated with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  for  $\text{Ni-MoS}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  composite coatings by pulse electrodeposition*. Surface and Coating Technology. 202(2008) 3208-3214.
13. J. Zhoua. G. Zhaoa. J. Lib. J. Chenb. S. Zhanga and J. Wang. *Electroplating of non-fluorinated superhydrophobic  $\text{Ni/WC/WS}_2$  composite coatings with high abrasive*