

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

تأثیر غلظت نانو الماس روی رفتار سایشی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-بور-نانو الماس

سید صابر میرحسینی^{۱*}، فرزاد محبوبی^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

s.mirhosseini@aut.ac.ir*

مقاله پژوهشی

چکیده

از مهم‌ترین عملیات تکمیلی که معمولاً به‌عنوان فرآیند نهایی به هنگام تولید یک قطعه انجام می‌شود، اصلاح خواص سطحی با عملیات مهندسی سطح است. تعداد بسیاری از فلزات را می‌توان به روش الکترولس پوشش دهی کرد. پوشش‌های الکترولس نیکل-بور به دلیل قیمت ارزان و قابلیت پوشش‌دهی یکنواخت، کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنعت یافته است. در این مقاله، پوشش الکترولس نیکل-بور-نانو الماس با غلظت‌های مختلف نانو الماس روی فولاد AISI ۴۱۴۰ لایه نشانی شد و خواص ساختاری و رفتار سایشی آن مورد بررسی قرار گرفت. خواص ساختاری پوشش‌ها به کمک آزمون‌های پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون سختی سنجی بررسی شد. همچنین ضریب اصطکاک و خواص سایشی نمونه‌ها به کمک آزمون پین روی دیسک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد با افزایش غلظت نانو الماس ساختار پوشش از حالت آمورف به حالت شبه بلوری تغییر می‌یابد. علاوه بر این، تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی نشان می‌دهد که اضافه کردن نانو الماس به حمام الکترولس سبب افزایش سختی می‌گردد. اضافه کردن نانو الماس تا غلظت 0.5 g/L باعث بهبود مقاومت سایشی و کاهش ضریب اصطکاک شد. با این وجود افزایش غلظت نانو الماس تا 1 g/L به دلیل آگلومره شدن نانو الماس‌ها سبب افزایش نرخ سایش ویژه پوشش شد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷

کلید واژگان:

نانو الماس

الکترولس

نیکل-بور

سایش

کامپوزیت

The Effect of Nanodiamond Concentration on Wear Behavior of Nickel-Boron-Nanodiamond Composite Coatings

Seyyed Saber Mirhosseini^{۱*}, Farzad Mahboubi^۲

۱- Ph.D. student, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

۲- Professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

* s.mirhosseini@aut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Dor:

Keywords:

Nanodiamond
Electroless
Nickel-Boron
Wear
Composite

Abstract

One of the most important finishing operations that is usually performed as the final process when producing a part is the modification of surface properties with surface engineering operations. Many metals can be coated by the electroless-coating method. Electroless nickel-boron coatings have been widely used in the industry due to their cheap price and uniform coating capability. In this article, nickel-boron-nanodiamond electroless coating with different concentrations of nanodiamond was applied on AISI 4140 steel, and its structural properties and wear behavior were investigated. The structural properties of the coatings were investigated with the help of X-ray diffraction tests, scanning electron microscopy, and hardness test. Also, the friction coefficient and wear properties of the samples were studied using the pin-on-disc test. The results show that with the increase in nanodiamond concentration, the structure of the coating changes from amorphous to semi-crystalline. In addition, the electron microscope images and the hardness test results show that adding nanodiamonds to the electroless bath increases the hardness. Adding nanodiamonds to a concentration of 0.5 g/L improved the wear resistance and reduced the friction coefficient.

However, increasing the concentration of nanodiamonds up to 1 g/L due to the agglomeration of nanodiamonds caused an increase in the specific wear rate of the coating.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Seyyed Saber Mirhosseini, Farzad Mahboubi, The Effect of Nanodiamond Concentration on Wear Behavior of Nickel-Boron-Nanodiamond Composite Coatings, New Process in Material Engineering, ۲۰۲۳, ۱۷(۳), ۶۳-۷۳.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به پیچیدگی کاربردهای قطعات مختلف در صنعت، نیاز به فرآیندهای چندگانه برای تولید یک قطعه امری اجتناب‌ناپذیر است. از جمله مهم‌ترین عملیات تکمیلی که معمولاً به‌عنوان فرآیند نهایی به هنگام تولید یک قطعه انجام می‌شود، اصلاح خواص سطحی با عملیات مهندسی سطح است. تعداد بسیاری از فلزات و مواد را می‌توان به روش الکترولس پوشش دهی کرد. این فرایند به توانایی در پوشش‌دهی سطوح هادی و عایق و تشکیل پوشش‌های پیوسته و با ضخامت یکنواخت شهرت دارد [۱]. پوشش‌های الکترولس نیکل به دلیل قیمت ارزان و قابلیت پوشش‌دهی یکنواخت، کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنعت یافته است [۲-۴]. این پوشش‌ها به سه گروه مختلف تقسیم می‌شوند: نیکل خالص، نیکل-بور، نیکل-فسفر [۵-۶]. پوشش الکترولس نیکل-بور نسبت به پوشش الکترولس نیکل-فسفر دارای سختی و مقاومت به سایش بالاتری است اما در اکثر مواقع، مقاومت به خوردگی آن نسبت به پوشش الکترولس نیکل-فسفر کمتر گزارش شده است. به دلیل داشتن خصوصیات ذکر شده، پوشش‌های Ni-B کاربردهای متعددی در صنایع شیمیایی و پتروشیمی، صنایع غذایی، هوافضا و اتومبیل‌سازی، ابزارهای برش، نساجی، قالب‌سازی و صنایع تسلیحاتی پیدا کرده‌اند [۷-۸]. نوع ساختار پوشش الکترولس نیکل-بور پس از آبکاری بستگی به درصد بور این پوشش دارد. زمانی که درصد بور پوشش ناچیز باشد، ساختار پوشش بلورین و زمانی که درصد بور در حدود ۵-۶ درصد وزنی باشد ساختار آمورف و در مقادیر میانی ساختار شامل هر دو فاز نیکل بلورین و فاز آمورف حاوی نیکل و بور خواهد بود [۹]. تحقیقات نشان می‌دهد ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی با اضافه کردن ذراتی مانند SiC، WC، Al₂O₃، TiO₂ سبب افزایش مقاومت در برابر سایش و بهبود خواص مکانیکی پوشش‌ها می‌گردد [۱۰-۱۳].

در سال‌های اخیر با توسعه روش‌های تولید نانو ذرات و دارا بودن خواص مکانیکی، شیمیایی و اپتیکی منحصربه‌فرد استفاده از آن‌ها در پوشش‌های کامپوزیتی الکترولس

گسترش یافته است [۱۴-۱۵]. با تولید نانو ذرات الماس (ND) با روش انفجاری توسط دانشمندان شوروی سابق استفاده از نانو ذرات الماس در هدایت‌کننده‌های حرارتی، پوشش‌های کامپوزیتی آبکاری الکتریکی و الکترولس، روغن‌های روان‌کننده و به‌عنوان عامل اضافه‌شده در محلول‌های برش، بیوشیمی، پزشکی و همچنین کامپوزیت‌های نانو الماسی و پلیمر، رو به گسترش است [۱۶]. از طرفی، نانو ذرات الماس خواص مکانیکی شیمیایی فوق‌العاده بالایی دارند؛ این خواص شامل پایداری شیمیایی بالا، خواص خود روانکاو خوب مقاومت به سایش عالی هستند [۱۷-۱۸]. ماتسوبارا [۱۷] نشان داد که با افزایش محتوای نانو الماس در محلول آبکاری الکترولس میزان نانو الماس درون پوشش افزایش خواهد یافت؛ اما از طرف دیگر، بازدهی هم رسوبی ذرات نیز به همان نسبت کاهش می‌یابد. ردی [۱۹] و ژو [۲۰] نشان دادند که پوشش کامپوزیتی با ذرات الماس کوچک‌تر مقاومت به سایش بالاتری خواهند داشت. در پژوهش‌های انجام‌شده توسط مظاهری [۲۱] و عبدلی [۲۲] متوسط اندازه نانو ذرات الماس استفاده شده به ترتیب ۲۰ و ۵ نانومتر بوده و از محلولی تجاری به‌منظور ایجاد پوشش کامپوزیتی استفاده شده است. در پوشش‌های کامپوزیتی الکترولس نیکل فسفر نانو الماس ایجادشده توسط مظاهری و هوی ژو [۲۳]، با قرارگیری نانو ذرات الماس درون پوشش الکترولس نیکل-فسفر، سختی، مقاومت به سایش و خوردگی پوشش افزایش یافت. در تمامی موارد ذکر شده، تأثیر نانو الماس بر پوشش‌های الکترولس نیکل-فسفر بررسی شده و هنوز تحقیق جامعی در زمینه پوشش‌های الکترولس نیکل-بور تقویت‌شده با نانو الماس صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش بررسی اثر غلظت‌های مختلف نانو الماس روی خواص ساختاری، سختی و مقاومت سایشی پوشش‌های الکترولس نیکل-بور-نانو الماس است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد مصرفی و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش از کلرید نیکل ۶ آبه (منبع یون نیکل)، اتیلن دی آمین (عامل کمپلکس کننده)، نیترات سرب (پایدارکننده)، سود سوزآور (بافر)، سدیم بوروهیدرید (عامل احیاکننده) و نانو الماس‌های فوق پخش شده (UDD)^۱ استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۱ سانتی‌متر از جنس فولاد AISI ۴۱۴۰ به‌عنوان زیرلایه مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور بهبود خواص مکانیکی مانند سختی و همچنین حذف تاربخچه عملیات حرارتی، نمونه‌ها ۳۰ دقیقه در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد آستنیت شده و سپس بلافاصله در روغن سرد شدند. در ادامه، به‌منظور بازپخت در دمای ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفتند. سطح نمونه‌ها با استفاده از ورق‌های SiC سمباده زنی شد. فقط چند ثانیه قبل از پوشش دهی از محلول ۱۰٪wt NaOH برای حذف آلاینده‌های آلی موجود روی سطح نمونه‌ها استفاده شد. پس از آن نمونه‌ها به کمک آب مقطر شستشو داده شدند و به‌منظور فعال‌سازی سطح آن‌ها برای پوشش دهی به مدت یک دقیقه در داخل محلول هیدروکلریک اسید قرار داده شدند.

۲-۲- فرایند پوشش دهی نمونه‌ها

نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی به‌منظور پوشش دهی به مدت ۱ ساعت در حمام الکترولس با ترکیب و شرایط ذکر شده در جدول (۱) و (۲) قرار گرفتند. حمام الکترولس درون حمام روغن قرار گرفته و به کمک همزن در زمان پوشش دهی هم زده شد. همچنین برای یکنواختی پوشش، نمونه‌ها نیز درون حمام الکترولس چرخانده شده و هر دو دقیقه یک‌بار جهت چرخش عوض می‌شد. دمای پوشش دهی به کمک دماسنج جیوه‌ای در ۹۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد و در مدت زمان پوشش دهی در همین دما نگه داشته شد. با در نظر گرفتن شرایط پوشش دهی نیکل-بور مقادیر ۰/۱، ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر نانو الماس ابتدا در حمام التراسونیک قرار گرفته و بعد از حدود ۳۰ دقیقه، به حمام آبکاری نیکل-بور

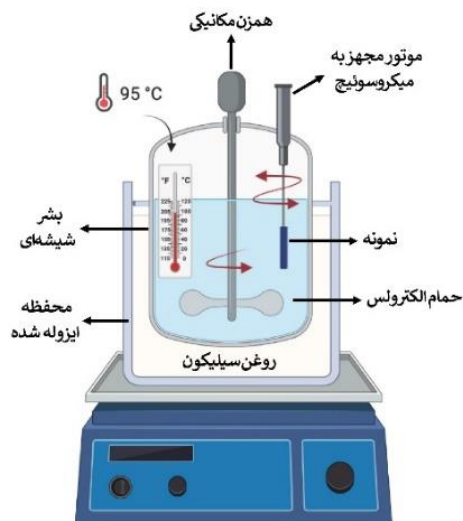
اضافه گشتند. سیستم طراحی شده برای حمام الکترولس و شماتیک فرایند تولید نمونه‌های پوشش دهی شده در حمام الکترولس نیکل-بور-نانوالماس به ترتیب در شکل (۱) و (۲) قابل مشاهده است. همچنین برای ساده‌سازی اسامی نمونه‌ها، کدگذاری انجام شد که در جدول (۳) شرح داده شده است. فلوجارت مراحل ساخت نمونه‌های پوشش دهی شده در حمام الکترولس نیکل-بور-نانوالماس در شکل (۳) قابل مشاهده است.

جدول (۱): ترکیبات حمام الکترولس استفاده شده برای پوشش دهی.

غلظت	ترکیبات حمام
۲۵ g/L	NiCl _۲ ·۶H _۲ O
۶۰ cc/L	C _۲ H _۸ N _۲
۰.۰۲ g/L	Pb(NO _۳) _۲
۳۹ g/L	NaOH
۰.۶ g/L	NaBH _۴
۰.۱, ۰.۵, ۱ g/L	UDD

جدول (۲): شرایط حمام الکترولس استفاده شده برای پوشش دهی.

حجم حمام	۵۰۰ cc
pH	۱۴
زمان آبکاری	۶۰ min
دما	۹۵ ± ۱ °C



شکل (۱): سیستم طراحی شده برای حمام الکترولس.

($\lambda=1.54187\text{\AA}$) استفاده شد. آزمون میکروسختی پوشش‌ها با کمک دستگاه Shimadzu و اعمال نیروی ۵۰ گرم انجام گرفت. مقدار میانگین سختی حاصل از ۵ آزمون گرفته شده گزارش شد. به منظور بررسی میزان زبری نمونه‌ها از دستگاه زبری سنج TR۲۰۰ استفاده گشت و مقدار میانگین حاصل از ۱۰ اندازه‌گیری گزارش شد. به منظور بررسی خواص سایشی نمونه‌ها از دستگاه پین روی دیسک مطابق با استاندارد ASTM G۹۹ استفاده شد. پین مورد استفاده در این آزمایش از جنس فولاد AISI ۵۲۱۰۰ با قطر ۵ میلی‌متر و سختی ۶۲ راکول سی بود. در آزمون سایش، مقدار سایش از روی کاهش جرم یا کاهش حجم نمونه به دست می‌آید. مقدار سایش بستگی به نیرو، مسافت، محیط، روش انجام آزمون و سرعت دارد [۲۴]. آزمایش سایش با اعمال نیروی عمودی ۱۰ نیوتن، سرعت لغزش $0.05\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ و مسافت ۵۰۰ متر انجام گرفت. دمای اتاق در طول آزمون ۲۵ درجه سانتی‌گراد و میزان رطوبت هوا ۴۰ درصد بوده است. دیاگرام ضریب اصطکاک برحسب مسافت توسط دستگاه ضبط شده و سطح ساییده شده نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. مقدار جرم نمونه‌ها قبل و بعد از سایش توسط ترازو با دقت ۰/۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری شد و نرخ سایش ویژه نمونه‌ها مطابق با فرمول زیر محاسبه شد.

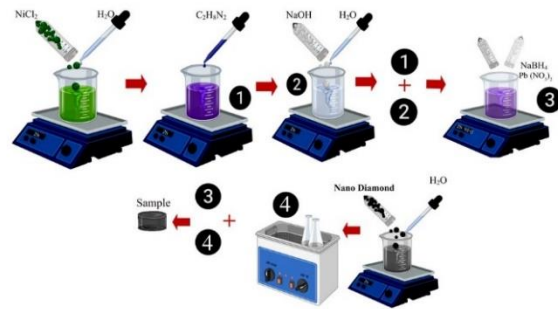
$$Ws = m / (d \times F) \quad (1) \text{ مدل}$$

که در آن Ws نرخ سایش ویژه، m میزان جرم ساییده شده، F نیروی اعمالی و d مسافت پیموده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه یابی نانوالماس

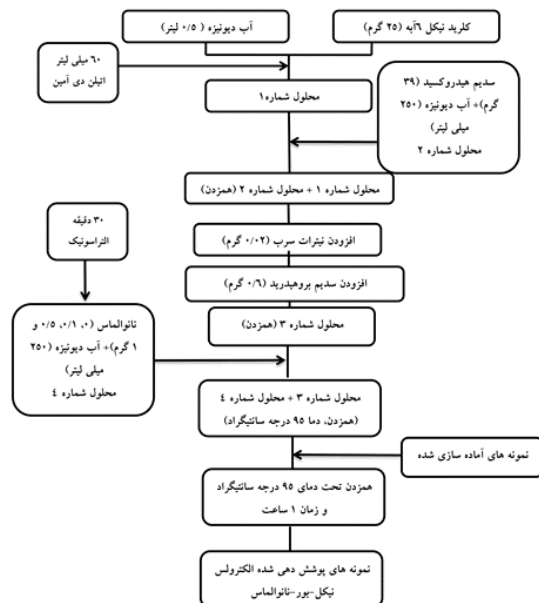
تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و طیف پراش اشعه ایکس نانو الماس‌ها به ترتیب در شکل (۴) و (۵) آورده شده است. همان‌طور که در تصویر میکروسکوپی دیده می‌شود این ذرات زیر ۱۰۰ نانومتر با قطر میانگین حدود ۳۰nm و هندسه کروی شکل هستند. همچنین در طیف پراش اشعه ایکس وجود دو قله پراش در



شکل (۲): شماتیک فرایند تولید نمونه‌های پوشش دهی شده در حمام الکترولس نیکل-بور-نانوالماس.

جدول (۳): کدگذاری نمونه‌های به کار برده شده در مقاله.

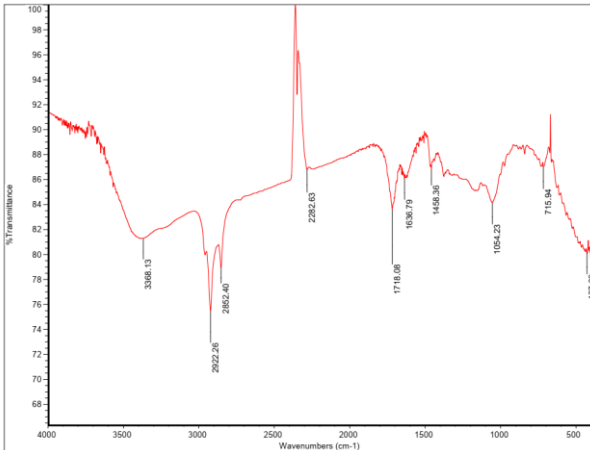
ردیف	نام نمونه	کد نمونه
۱	نیکل-بور	NiB-۰g/L UDD
۲	نیکل-بور - ۰/۱ g/L نانوالماس	NiB-۰.۱g/L UDD
۳	نیکل-بور - ۰/۵ g/L نانوالماس	NiB-۰.۵g/L UDD
۴	نیکل-بور - ۱ g/L نانوالماس	NiB-۱g/L UDD



شکل (۳): فلوچارت مراحل ساخت نمونه‌های پوشش دهی شده در حمام الکترولس نیکل-بور-نانوالماس.

۳-۲- مشخصه یابی نمونه‌ها

مورفولوژی پوشش‌ها با کمک میکروسکوپ الکترونی MIRA II TESCAN مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی گروه‌های عاملی نانو الماس‌ها به کمک آزمون مشخصه یابی FTIR انجام شد. به منظور بررسی فازی و ساختار بلوری پوشش‌ها از آزمون پراش اشعه ایکس با طول موج $Cu\ K\alpha$

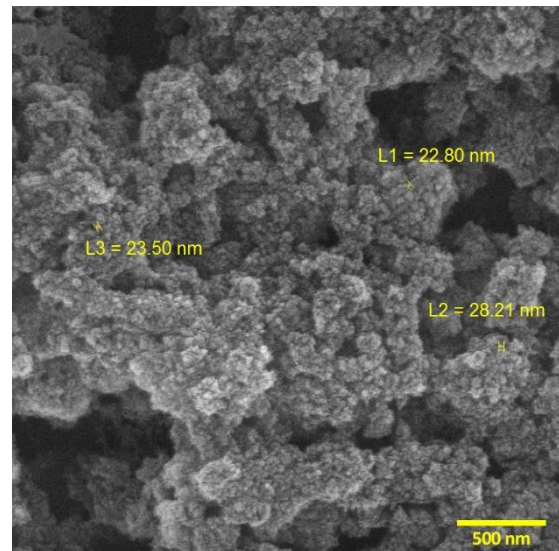


شکل (۶): طیف FTIR مربوط به نانو الماس.

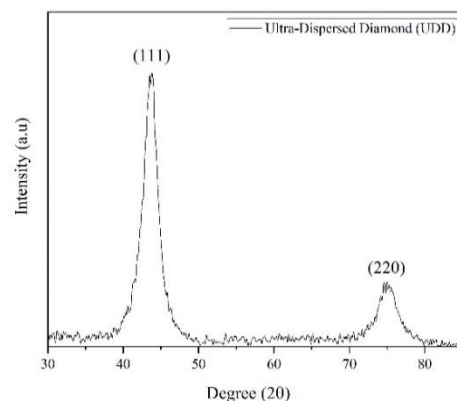
۲-۳- آنالیز پراش اشعه ایکس

نتایج حاصل از آزمون پراش اشعه ایکس پوشش‌های نیکل-بور-نانوالماس در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پوشش نیکل-بور شامل یک پیک پهن در زاویه ۴۵ درجه است. این پیک مربوط به پراش صفحه (۱۱۱) فاز نیکل است. وجود این پیک پهن بیانگر این است که ساختار پوشش به صورت آمورف است. علت آمورف بودن ساختار این پوشش وجود اتم‌های بور است که از جوانه‌زنی اتم‌های نیکل به صورت منظم و بلوری جلوگیری می‌کند [۲۵]؛ ساختارهای نیمه بلوری^۲ یا بی‌نظم پوشش‌های نیکل-بور توسط تعداد زیادی از محققین گزارش شده است که فاز بی‌نظم بور و مانع شدن آن برای جوانه زدن فاز نیکل را عامل آن می‌دانند [۲۶]؛ اما همان‌گونه که مشاهده می‌شود با اضافه کردن نانو الماس پهنای پیک کاهش یافته است. کاهش پهنای پیک در نمونه‌های حاوی نانو الماس نشان می‌دهد که ساختار پوشش از حالت آمورف به حالت شبه بلوری تغییر یافته است. همان‌گونه که ویتری و همکارانش [۲۷] بیان کرده‌اند در صورتی که پهنای پیک مشاهده شده در نتایج آزمون پراش اشعه ایکس پوشش نیکل-بور کاهش یابد می‌توان نتیجه گرفت که ساختار از حالت آمورف به شبه بلوری تغییر کرده است. نتایج مشابهی در افزودن ذرات SiC و نانولوله‌های کربنی به حمام نیکل-بور توسط محققان مشاهده شده است که آن‌ها نیز علت کاهش پهنای پیک

زوایای $\theta_2=43/9^\circ$ و $\theta_2=43/9^\circ$ به ترتیب مربوط به صفحات اتمی (۱۱۱) و (۲۲۰) بوده و با شماره کارت ۰۱-۰۷۵-۰۲۲۱ مربوط به الماس کاملاً مطابقت دارد. لازم به ذکر است که قله‌های الگوی پراش اشعه ایکس نانو الماس به دلیل اندازه متوسط کریستالیت بسیار کوچکشان اندکی عریض و پهن هستند. طیف FTIR حاصل از نانو الماس‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. پیک‌های موجود در عددهای موج ۳۳۶۸، ۲۹۲۰، ۱۷۱۸ و ۱۰۵۴ نشان از تأیید وجود عامل‌های سطحی -COOH، -C=O، -CH₂ و -OH برای کمک به بهبود پخش شدن این ذرات در حمام الکترولس دارد.



شکل (۴): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نانو الماس‌ها.

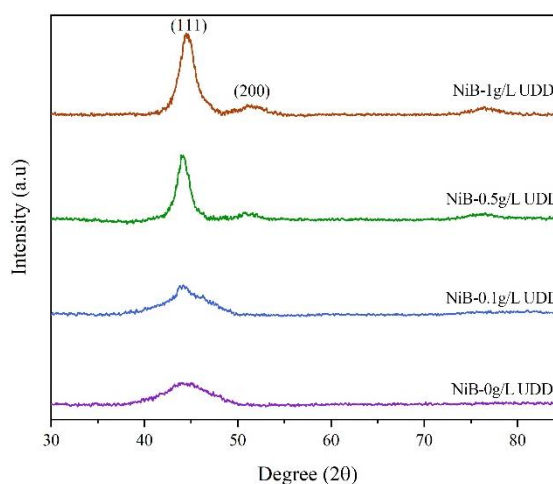


شکل (۵): طیف پراش اشعه ایکس نانو الماس‌ها.

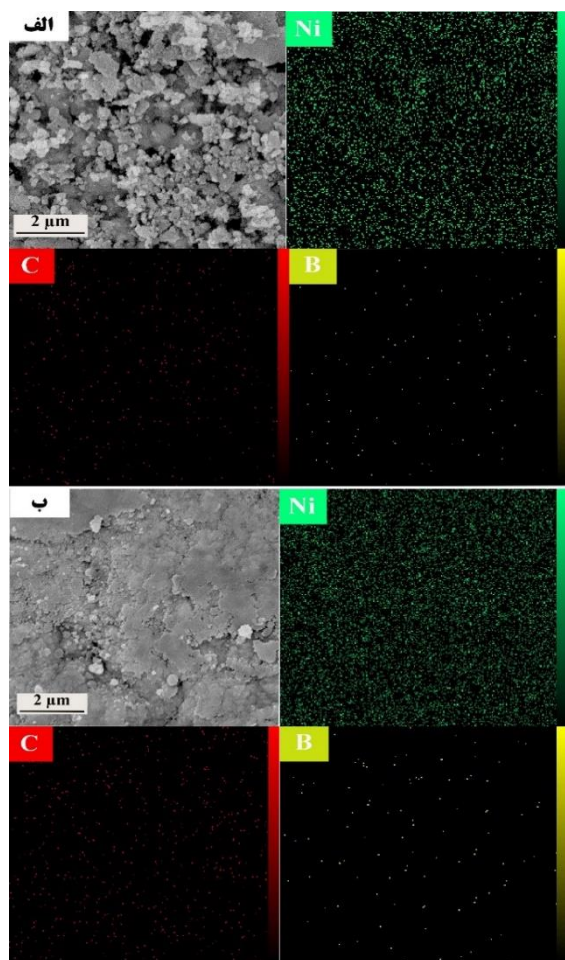
۳-۳- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح نمونه‌ها را نشان می‌دهد. پوشش‌های الکترولس نیکل-بور دارای ساختار گل کلمی شکل می‌باشند [۳۰] و همان‌گونه که دیده می‌شود سطح پوشش نیکل-بور به صورت جزیره و دارای ترک است. این ترک‌ها به دلیل آزاد شدن گاز هیدروژن در حمام در ساختار به وجود آمده‌اند. با اضافه کردن نانو ذرات الماس مقدار این ترک‌ها کاهش یافت و همان‌طور که از تصاویر مشخص است با قرار گرفتن این نانو ذرات درون ترک‌ها موجب پر شدن آن‌ها و یکنواختی بیشتر پوشش شده‌اند. با این حال در نمونه حاوی 0.1g/L نانو الماس تغییر شدیدی در مورفولوژی سطح مشاهده نمی‌شود که به نظر می‌رسد به دلیل غلظت کم نانو الماس، منطقی است. افزایش غلظت نانو الماس تا 0.5g/L موجب شد تا سطح پوشش همگن و یکنواخت شود و تقریباً اثری از شکاف‌ها مشاهده نشود. با افزایش غلظت نانو الماس به 1g/L و در واقع با افزایش برهمکنش نانو الماس‌ها با هم کلوخه شدن^۳ و کاهش کیفیت سطحی مشاهده شد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی از مقطع عرضی پوشش الکترولس Ni-B-ND در حالت خام در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل ویژگی بارز و رایج پوشش‌های الکترولس Ni-B یعنی رشد ستونی پوشش با ضخامت یکنواخت به وضوح مشاهده می‌شود و بعد از ۱ ساعت قرارگیری نمونه‌ها تحت شرایط الکترولس، ضخامت اندازه‌گیری شده برای تمامی نمونه‌ها به طور میانگین ۱۳ تا ۱۵ میکرون بوده است. تصویر نقشه توزیع عناصر در نمونه‌های NiB/0.5ND و NiB/1ND نیز در شکل (۱۰) آورده شده است که افزایش ورود نانو الماس به ساختار پوشش و توزیع عناصر کربن، نیکل و بور را نشان می‌دهد و وجود کربن در ساختار تأییدکننده حضور نانوالماس در پوشش الکترولس Ni-B است.

پوشش نیکل-بور را تبدیل ساختار بلوری پوشش از حالت آمورف به حالت شبه بلوری بیان کرده‌اند [۱۳ و ۲۸]؛ بنابراین می‌توان به این نتیجه دست یافت که با افزایش نانو ذرات الماس در ساختار آرایش اتم‌ها تغییر می‌کند و یک حالت شبه بلوری را به وجود می‌آورند. علت این امر این است که نانو ذرات الماس به عنوان یک عامل احیاکننده برای نیکل عمل کرده و در واقع اتم‌های نیکل شروع به جوانه‌زنی در محل نانو ذرات می‌کنند که سبب می‌شود سرعت جوانه‌زنی و رشد نیکل افزایش یافته و ساختار به حالت شبه بلوری تبدیل گردد. از طرف دیگر عامل‌های سطحی روی این نانو ذرات با ورود به محلولی با pH بالای ۷ می‌توانند یون H^+ از گروه کربوکسیلیک خود آزاد کنند. در نتیجه این اتفاق، یون HCOO^- از گروه کربوکسیلیک آن‌ها باقی می‌ماند که قابلیت احیاکنندگی بالایی داشته و می‌تواند باعث احیای یون‌های نیکل حمام شود؛ که در نتیجه آن تعداد جوانه‌های بیشتری از نیکل روی پوشش ایجاد می‌شود [۲۹]. علاوه بر این همان‌گونه که مشاهده می‌شود هیچ‌گونه پیکی از اتم‌های کربن در نتایج آزمایش اشعه ایکس یافت نشد که علت آن در واقع کم بودن غلظت نانو ذرات الماس است.



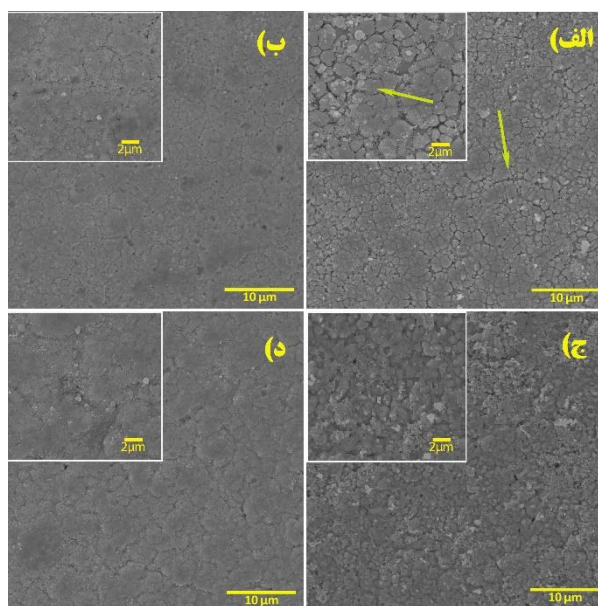
شکل (۷): الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های پوشش داده شده.



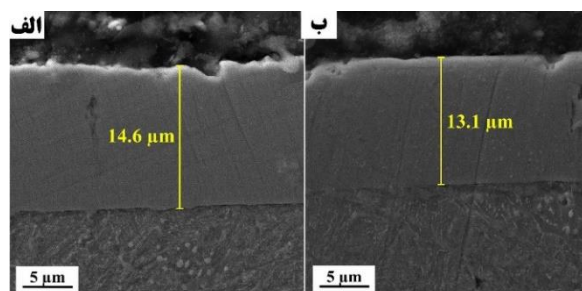
شکل (۱۰): تصویر نقشه توزیع عناصر در نمونه‌های الف) $\text{NiB}/1\text{ND}$ و ب) $\text{NiB}/0.5\text{ND}$.

۳-۴- آنالیز میکروسختی

شکل شماره ۱۱ نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود افزایش غلظت نانو ذرات الماس تا غلظت 0.5 g/L سبب افزایش سختی پوشش تا مقدار ۷۴۰ ویکرز می‌گردد. علت این امر این است که نانو ذرات الماس به‌عنوان یک عامل کامپوزیت‌ساز با سختی بالا، سبب افزایش خواص مکانیکی زمینه نیکل می‌گردد. در واقع افزایش غلظت نانو ذرات الماس سبب ایجاد توزیع یکنواخت‌تری از آن‌ها در زمینه نیکلی، جوانه‌زنی بیشتر فاز نیکل و افزایش سختی می‌گردد. با این‌وجود همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش غلظت نانو ذرات الماس تا غلظت 1 g/L باعث کاهش سختی پوشش به مقدار ۶۸۴ ویکرز شده است. علت این امر می‌تواند به دلیل آگلومره شدن نانو ذرات در غلظت‌های بالا



شکل (۸): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌های الف) نیکل-بور، ب) نیکل-بور- 0.1 g/L نانوالماس، ج) نیکل-بور- 0.5 g/L نیکل-بور، د) نیکل-بور- 1 g/L نانوالماس.



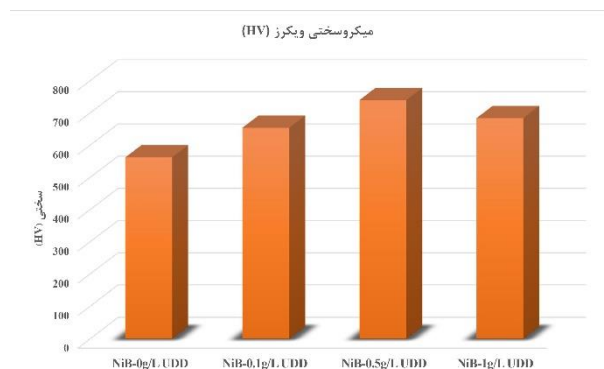
شکل (۹): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع عرضی نمونه‌های الف) نیکل-بور، ب) نیکل-بور- 0.5 g/L نانوالماس.

۳-۳- بررسی رفتار سایشی

نمودار ضریب اصطکاک بر حسب فاصله نمونه‌ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزودن ذرات سخت نانو الماس به پوشش، در ضریب اصطکاک اندکی افزایش مشاهده می‌شود. البته همان‌طور که قبلاً اشاره شد در نمونه حاوی 0.5 g/L نانو الماس به دلیل پر شدن بهتر ترک‌ها و قرارگیری مناسب‌تر نانو ذرات در پوشش، یک پوشش یکنواخت حاصل شده و در نتیجه کمترین نوسان در ضریب اصطکاک و همچنین میانگین ضریب اصطکاک کمتری مشاهده می‌شود. یکی دیگر از عوامل مهم در کاهش ضریب اصطکاک، سختی پوشش هست. همان‌گونه که در قسمت قبل بیان شد در نمونه حاوی 0.5 g/L نانو الماس سختی پوشش قابل توجه بوده و این امر از تغییر شکل پلاستیک پوشش جلوگیری می‌کند. در نهایت نیروی محرکه بیشتری برای کنده شدن ذرات نیاز می‌شود و در نتیجه آن ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. نوسانات و میانگین ضریب اصطکاک بیشتر در نمونه با غلظت 1 g/L نانو الماس مشاهده می‌شود که علت این امر می‌تواند کنده شدن ذرات آگلومره نانو الماس باشد که پیوند بسیار ضعیفی با زمینه داشته و کنده شدن آن‌ها باعث افزایش نرخ سایش و افزایش ضریب اصطکاک می‌شود.

جدول (۵) مقدار میانگین ضریب اصطکاک، مقدار جرم از دست‌رفته پوشش در اثر سایش و نرخ سایش ویژه را نشان می‌دهد. کمترین میزان نرخ سایش ویژه برای نمونه حاوی 0.5 g/L نانو الماس به دست آمده است. علت این امر سختی بالای این نمونه، ضریب اصطکاک کم و توزیع یکنواخت‌تر نانو ذرات الماس در ساختار این پوشش هست.

و در نتیجه ورود کمتر این ذرات به پوشش در حین فرایند پوشش‌دهی و البته ایجاد یک فصل مشترک غیرهمدوس با زمینه باشد که موجب کاهش خواص مکانیکی پوشش می‌گردد. برخی از محققان نشان می‌دهد که میزان سختی پوشش‌های نیکل-بور پس از آبکاری بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ ویکرز (بنا بر مقدار غلظت بور موجود در فرایند پوشش‌دهی) است [۳۱-۳۲] که در این تحقیق با افزودن نانو الماس مقدار سختی از ۵۶۲ ویکرز به ۷۴۰ ویکرز افزایش یافت.



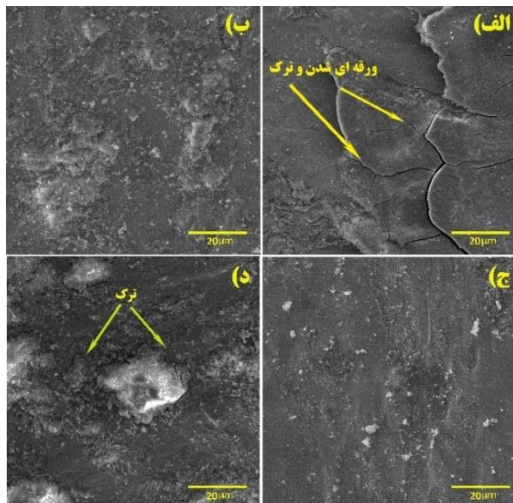
شکل (۱۱): نتایج میکروسختی سنجی نمونه‌های پوشش داده شده.

نتایج حاصل از آزمون زبری سنجی نمونه‌های پوشش داده شده در جدول (۴) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش غلظت نانو الماس منجر به افزایش قابل توجه زبری می‌شود. این امر به این معنی است که نانو الماس مانع از رشد یکنواخت نیکل روی سطح شده و در نهایت به دلیل رشد غیریکنواخت جوانه‌های نیکل روی سطح، زبری سطح افزایش می‌یابد. علاوه بر این زبری بالای به دست آمده در نمونه $\text{NiB}/1\text{ND}$ می‌تواند به دلیل غلظت بالای نانو الماس‌ها باشد که باعث کلوخه شدن آن‌ها و ایجاد ذرات درشت روی سطح می‌شود.

جدول (۴): زبری سطح نمونه‌های پوشش داده شده

ردیف	نام نمونه	زبری
۱	زیرلایه	۰/۰۳۰
۲	$\text{NiB}-0 \text{ g/L UDD}$	۰/۰۵۷
۳	$\text{NiB}-0.1 \text{ g/L UDD}$	۰/۱۱۰
۴	$\text{NiB}-0.5 \text{ g/L UDD}$	۰/۱۴۰
۵	$\text{NiB}-1 \text{ g/L UDD}$	۰/۱۵۱

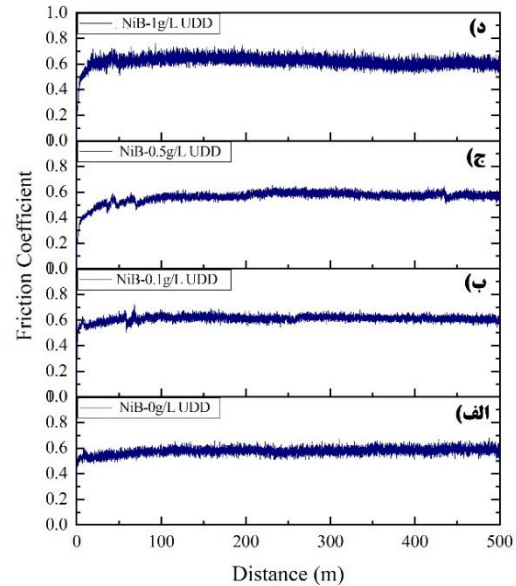
انحلال‌پذیری بالای آهن موجود در پین با نیکل موجود در پوشش مرتبط دانست [۳۳]. در واقع انحلال شدید این دو عنصر سبب ایجاد جوش موضعی بین پین و سطح پوشش می‌شود که در اثر چرخش‌های مکرر پین روی سطح نمونه، کندگی شدیدی را ایجاد می‌کند. با مشاهده تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح ساییده شده و اثر تورقی شدن پوشش نیکل-بور می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که مکانیزم غالب حاکم در این سایش از نوع سایش چسبان است [۳۴-۳۵]. با افزایش غلظت نانو ذرات الماس تا غلظت ۰/۵ g/L همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی دیده می‌شود میزان کندگی موجود در سطح کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه ایجاد یک سطح سخت‌تر، تماس بین سطح پوشش و پین را کاهش داده و در نتیجه مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت نانو ذرات الماس تا غلظت ۱ g/L مشاهده می‌شود شیاریایی در نواحی ساییده شده به وجود آمده است. علت این امر کنده شدن ذرات آگلومره نانو الماس بوده که در اثر جدا شدن از پوشش، شیاریایی عمیق را به‌جا می‌گذارد.



شکل (۱۳): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح ساییده شده نمونه‌های الف) نیکل-بور، ب) نیکل-بور-۰/۱ نانوالماس، ج) نیکل-بور-۰/۵ نانوالماس و د) نیکل-بور-۱ نانوالماس.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر غلظت نانو ذرات الماس روی خواص ساختاری و مقاومت سایشی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-



شکل (۱۲): نمودار ضریب اصطکاک برحسب فاصله نمونه‌های الف) نیکل-بور، ب) نیکل-بور-۰/۱ نانوالماس، ج) نیکل-بور-۰/۵ نانوالماس و د) نیکل-بور-۱ نانوالماس.

جدول (۵): نتایج آزمون سایش نمونه‌های پوشش داده شده.

نمونه	ضریب اصطکاک	جرم ازدست‌رفته (mg)	نرخ سایش ویژه ((kg/N.m) × 10 ⁻⁶)
نیکل-بور	۰/۵۸	۳/۹	۷/۸ × ۱۰ ^{-۴}
نیکل-بور-۰/۱ نانوالماس	۰/۶۱	۳/۵	۷ × ۱۰ ^{-۴}
نیکل-بور-۰/۵ نانوالماس	۰/۵۶	۲	۴ × ۱۰ ^{-۴}
نیکل-بور-۱ نانوالماس	۰/۶۲	۲/۶	۵/۲ × ۱۰ ^{-۴}

شکل شماره (۱۳) تصاویر سطح ساییده شده نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در نمونه نیکل-بور کندگی بسیار شدیدتری نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده می‌شود. علت این امر سختی کم، ترک‌دار بودن و غیریکنواختی پوشش و در نتیجه مقاومت سایشی کمتر این پوشش نسبت به پوشش‌های حاوی نانو الماس است. از روی تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده پوشش نیکل-بور می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که مکانیزم سایش در این نمونه از نوع سایش چسبان می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه بدون الماس، ورقه‌ای شدن و ترک‌های بیشتری دیده می‌شود. علت این امر را می‌توان به

[۶] V. Vitry & L. Bonin, "Formation and characterization of multilayers borohydride and hypophosphite reduced electroless nickel deposits", *Electrochim. Acta*, vol. ۲۴۳, pp. ۷-۱۷, ۲۰۱۷.

[۷] F. Madah, A. A. Amadeh & C. Dehghanian, "Investigation on the phase transformation of electroless Ni-B coating after dry sliding against alumina ball", *J. Alloys Compd*, vol. ۶۵۸, pp. ۲۷۲-۲۷۹, ۲۰۱۶.

[۸] A. Mukhopadhyay, T. K. Barman & P. Sahoo, "Tribological behavior of sodium borohydride reduced electroless nickel alloy coatings at room and elevated temperatures", *Surf. Coatings Technol*, vol. ۳۲۱, pp. ۴۶۴-۴۷۶, ۲۰۱۴.

[۹] M. Anik, E. Körpe & E. Şen, "Effect of coating bath composition on the properties of electroless nickel-boron films", *Surf. Coatings Technol*, vol. ۲۰۲, pp. ۱۷۱۸-۱۷۲۷, ۲۰۰۸.

[۱۰] P. Wu, H. M. Du, X. L. Chen, Z. Q. Li, H. L. Bai & E. Y. Jiang, "Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings", *Wear*, vol. ۲۵۷, pp. ۱۴۲-۱۴۷, ۲۰۰۴.

[۱۱] L. Chen, L. Wang, Z. Zeng & T. Xu, "Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni-Al₂O₃ composite coatings", *Surf. Coatings Technol*, vol. ۲۰۱, pp. ۵۹۹-۶۰۵, ۲۰۰۶.

[۱۲] M. Mu, X. Zhou, Q. Xiao, J. Liang & X. Huo, "Preparation and tribological properties of self-lubricating TiO₂/graphite composite coating on Ti-6Al-4V alloy", *Appl. Surf. Sci*, vol. ۲۵۸, pp. ۸۵۷۰-۸۵۷۶, ۲۰۱۲.

[۱۳] E. Georgiza, V. Gouda & P. Vassiliou, "Production and properties of composite electroless Ni-B-SiC coatings", *Surf. Coatings Technol*, vol. ۳۲۵, pp. ۴۶-۵۱, ۲۰۱۷.

[۱۴] C. Gheorghies, G. Carac & I. V Stasi, "Preparation and structural characterization of nickel/alumina nano-particles composite coatings", *J. Optoelectron. Adv. Mater*, vol. ۸, pp. ۱۲۳۴, ۲۰۰۶.

بور-نانو الماس بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش غلظت نانو ذرات الماس ساختار پوشش از حالت آمورف به حالت شبه بلوری تغییر می‌کند. نتایج حاصل از آزمون سایش نشان داد که غلظت نانو ذرات الماس روی مقاومت سایشی پوشش تأثیرگذار بوده و به‌عنوان یک ماده کامپوزیت ساز با سختی بالا، باعث افزایش سختی پوشش حاصله از ۵۶۲ ویکرز به ۷۴۰ ویکرز و کاهش نرخ سایش ویژه از $7/8 \times 10^{-4}$ به 4×10^{-4} برای نمونه بدون نانوالماس و نمونه دارای نانوالماس با غلظت ۰/۵ g/L می‌گردد. در نتیجه، اضافه کردن نانو الماس تا غلظت ۰/۵ g/L باعث بهبود مقاومت سایشی و کاهش ضریب اصطکاک شد. باین وجود غلظت زیاد نانو ذرات الماس به دلیل آگلومره شدن آن‌ها می‌تواند باعث افت سختی و در نتیجه کاهش مقاومت سایشی پوشش شود.

۵- مراجع

[۱] V. Vitry & F. Delaunois, "Formation of borohydride-reduced nickel - boron coatings on various steel substrates", *Appl. Surf. Sci*, vol. ۳۵۹, pp. ۶۹۲-۷۰۳, ۲۰۱۵.

[۲] Q. Rao, G. Bi, Q. Lu, H. Wang & X. Fan, "Microstructure evolution of electroless Ni-B film during its depositing process", *Appl. Surf. Sci*, vol. ۲۴۰, pp. ۲۸-۳۳, ۲۰۰۵.

[۳] Z. A. Hamid, H. B. Hassan & A. M. Attyia, "Influence of deposition temperature and heat treatment on the performance of electroless Ni-B films", *Surf. Coatings Technol*, vol. ۲۰۵, pp. ۲۳۴۸-۲۳۵۴, ۲۰۱۰.

[۴] م. بیدرام، ک. امینی، ع. شفیعی و م. ح. بینا، "ایجاد پوشش کامپوزیتی نیکل-بور-کاربید تنگستن نانو کریستالی به روش الکتروکترولس و بررسی خواص تریبولوژیکی آن"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۷، شماره ۲، صفحه ۱۷-۲۳، ۱۳۹۲.

[۵] P. Sahoo & S. K. Das, "Tribology of electroless nickel coatings—a review" *Mater. Des*, vol. ۳۲, pp. ۱۷۶۰-۱۷۷۵, ۲۰۱۱

تنگستن به وسیله روش جوش کاری قوس تنگستن-گاز"، مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین، شماره ۲۱، صفحه ۱۴۸۸-۱۴۷۵، ۱۳۹۶.

[۲۵] V. Vitry, A. Sens, A. F. Kanta & F. Delaunois, "Experimental study on the formation and growth of electroless nickel-boron coatings from borohydride-reduced bath on mild steel", Appl. Surf. Sci, vol. ۲۶۳, pp. ۶۴۰-۶۴۷, ۲۰۱۲.

[۲۶] Q. L. Rao, G. Bi, Q. H. Lu, H. W. Wang & X. L. Fan, "Microstructure evolution of electroless Ni-B film during its depositing process", Appl. Surf. Sci, vol. ۲۴۰, pp. ۲۸-۳۳, ۲۰۰۵.

[۲۷] V. Vitry & L. Bonin, "Increase of boron content in electroless nickel-boron coating by modification of plating conditions", Surf. Coatings Technol, vol. ۳۱۱, pp. ۱۶۴-۱۷۱, ۲۰۱۷.

[۲۸] S. Yazdani, R. Tima & F. Mahboubi, "Investigation of wear behavior of as-plated and plasma-nitrided Ni-B-CNT electroless having different CNTs concentration", Appl. Surf. Sci, vol. ۴۵۷, pp. ۹۴۲-۹۵۵, ۲۰۱۸.

[۲۹] L. Gou, P. G. Liu, D. Liu, C. Y. Wang, H. Y. Lei, Z. Y. Li, X. Y. Fan & D. L. Li, "Rational synthesis of Ni_۳(HCOO)_۶/CNT ellipsoids with enhanced lithium storage performance: inspired by the time evolution of the growth process of a nickel formate framework", Dalt. Trans, vol. ۴۶, pp. ۶۴۷۳-۶۴۸۲, ۲۰۱۷.

[۳۰] ی. ذاکری نیا و ر. بازرگان لاری، "اعمال پوشش نانو کامپوزیتی Ni-B-ZrO_۲ به روش الکترولس بر روی فولاد CK۴۵ و بررسی خواص تریبولوژیکی آن"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۰، شماره ۴، صفحه ۸۹-۹۹، ۱۳۹۵.

[۳۱] V. Vitry & L. Bonin, "Increase of boron content in electroless nickel-boron coating by modification of plating conditions", Surf. Coatings Technol, vol. ۳۱۱, pp. ۱۶۴-۱۷۱, ۲۰۱۷.

[۳۲] V. Vitry, A. Sens, A. F. Kanta & F. Delaunois, "Experimental study on the formation and growth of electroless nickel-boron coatings from borohydride-reduced bath on mild steel", Appl. Surf. Sci, vol. ۲۶۳, pp. ۶۴۰-۶۴۷, ۲۰۱۲.

[۱۵] C. Li, Y. Wang & Z. Pan, "Wear resistance enhancement of electroless nanocomposite coatings via incorporation of alumina nanoparticles prepared by milling", Mater. Des, vol. ۴۷, pp. ۴۴۳-۴۴۸, ۲۰۱۳.

[۱۶] K. Iakoubovskii, M. V Baidakova, B. H. Wouters, A. Stesmans, G. J. Adriaenssens, A. Y. Vul & P. J. Grobet, "Structure and defects of detonation synthesis nanodiamond", Diam. Relat. Mater, vol. ۹, pp. ۸۶۱-۸۶۵, ۲۰۰۰.

[۱۷] H. Matsubara, Y. Abe, Y. Chiba, H. Nishiyama, N. Saito, K. Hodouchi & Y. Inoue, "Co-deposition mechanism of nanodiamond with electrolessly plated nickel films", Electrochim. Acta, vol. ۵۲, ۲۰۱۷, pp. ۳۰۴۷-۳۰۵۲.

[۱۸] C. C. Hung, C. C. Lin & H. C. Shih, "Tribological studies of electroless nickel/diamond composite coatings on steels", Diam. Relat. Mater, vol. ۱۷, pp. ۸۵۳-۸۵۹, ۲۰۱۸.

[۱۹] V. V. N. Reddy, B. Ramamoorthy & P. K. Nair, "A study on the wear resistance of electroless Ni-P/Diamond composite coatings", Wear, vol. ۲۳۹, pp. ۱۱۱-۱۱۶, ۲۰۰۰.

[۲۰] Y. Zhu, Y. Chen, C. Zhu & X. Shen, "Ni-P-Nanodiamond composite electroless plating", Acta Metall. Sin. English Lett, vol. ۲۳, pp. ۴۰۹-۴۱۵, ۲۰۱۰.

[۲۱] H. Mazaheri & S. R. Allahkaram, "Deposition, characterization and electrochemical evaluation of Ni-P-nano diamond composite coatings", Appl. Surf. Sci, vol. ۲۵۸, pp. ۴۵۷۴-۴۵۸۰, ۲۰۱۲.

[۲۲] M. Abdoli, A. Sabour Rouhaghdam, "Preparation and characterization of Ni-P/nanodiamond coatings: Effects of surfactants", Diam. Relat. Mater, vol. ۳۱, pp. ۳۰-۳۷.

[۲۳] H. Xu, Z. Yang, M. K. Li, Y. L. Shi, Y. Huang & H. L. Li, "Synthesis and properties of electroless Ni-P-Nanometer Diamond composite coatings", Surf. Coatings Technol, vol. ۱۹۱, pp. ۱۶۱-۱۶۵, ۲۰۰۵.

[۲۴] ع. شجاعی ابری، م. علیزاده، ر. بارباز اصفهانی و س. صابر سمندری، "بررسی خواص سایشی، سختی، ریزساختاری و رفتار خوردگی فولاد St5۲ پوشش داده شده توسط ذرات نیکل-کاربید

relationships in thermally-annealed multi-walled carbon nanotubes", Carbon N. Y, vol. ۴۴, pp. ۲۱۹-۲۲۶, ۲۰۱۴.

[۳۳] S. Yazdani, R. Tima & F. Mahboubi, "Investigation of wear behavior of as-plated and plasma-nitrided Ni-B-CNT electroless having different CNTs concentration", Appl. Surf. Sci, vol. ۴۵۷, pp. ۹۴۲-۹۵۵, ۲۰۱۸.

۶- پی‌نوشت

[۱] Ultra Dispersed Diamond

[۲] Semi-crystalline

[۳] Agglomeration

[۳۴] E. Correa et al., "Tribological behavior of electroless Ni-B coatings on magnesium and AZ91D alloy", Wear. vol. ۳۰۵, pp. ۱۱۵-۱۲۳, ۲۰۱۳.

[۳۵] G. Yamamoto, K. Shirasu, Y. Nozaka, Y. Sato, T. Takagi & T. Hashida, "Structure-property