



ارزیابی ریزساختار، سختی و رفتار تریبولوژیکی پوشش الکترولس نانوکامپوزیتی Ni-P-Graphene

مولود سادات حسینی زاده^۱، بهنام لطفی^۲، زهره صادقیان^۲

^۱. گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دانشجوی کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد)

^۲. گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دانشیار)

چکیده

در این پژوهش از نانوصفحات گرافین به عنوان فاز تقویت کننده در زمینه Ni-P استفاده شد و پوشش الکترولس نانوکامپوزیتی Ni-P-Graphene بر روی زیرلایه ای از مس رسوب داده شد. جهت ارزیابی ریز ساختار از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدان (FESEM)، برای شناسایی فازها از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) و به منظور سختی سنجی از ریزسختی سنجی ویکرز استفاده شد. همچنین رفتار تریبولوژیکی پوشش با استفاده از آزمون پین روی دیسک مورد بررسی قرار گرفت و اثر مشارکت نانو صفحات گرافین در پوشش بر مکانیزم سایش، نرخ سایش و ضریب اصطکاک مشخص شد. یافته های آزمایشی نشان داد که پوشش الکترولس Ni-P-Graphene پوششی یکنواخت و عاری از تخلخل و ترک بوده و در فصل مشترک پیوستگی خوبی با زیرلایه دارد. سختی پوشش نانوکامپوزیتی Ni-P-Graphene با غلظت ۲۰ میلی گرم بر لیتر گرافین در محلول الکترولس، به میزان ۱۳۹۰ حاصل شد. مقاومت سایشی پوشش نانوکامپوزیتی Ni-P-Graphene نسبت به پوشش Ni-P تا ۹۷ درصد افزایش یافت. همچنین به دلیل مشارکت نانوصفحات گرافین در پوشش نانوکامپوزیتی، میانگین ضریب اصطکاک پوشش نسبت به پوشش Ni-P تا ۵۰ درصد کاهش یافته و به میزان ۰/۳۶ رسید.

واژه های کلیدی: گرافین، نانو کامپوزیت، پوشش الکترولس Ni-P، سختی، خواص تریبولوژیکی

^۱. Molood.hoseini@gmail.com

مقدمه

فرایند آبکاری الکترولس نیکل، روشی برای ایجاد پوشش نیکل بدون اعمال جریان خارجی است. در این روش الکترون مورد نیاز جهت احیای یون فلزی بوسیله واکنش‌های شیمیایی درون حمام تأمین می‌شود. اساس کار حمام‌های آبکاری الکترولس بر پایه ی احیای نمک‌های فلزی استوار است. پوشش حاصل در این روش در اثر واکنش اتوکاتالیتیک و احیای یون‌های فلزی توسط عوامل احیا کننده درون حمام همچون هیپوفسفیته، بوروهیدرید و یا آمینوبوران به دست می‌آید. از فرایند پوشش دهی الکترولس با هدف ایجاد پوشش فلزی پیوسته و یکنواخت استفاده می‌شود [۱].

پوشش‌های الکترولس نیکل-فسفر به دلیل خواص منحصر به فردی مانند مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش، لحیم پذیری، سختی بالا و ضخامت یکنواخت، در بسیاری از صنایع کاربرد دارند مانند صنایع خودروسازی، نفت و گاز، تجهیزات الکترونیک و کامپیوتر [۲]. در دهه‌ی اخیر مطالعات بر روی ایجاد پوشش‌های الکترولس نیکل-فسفر کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی متمرکز شده است. این قبیل پوشش‌ها از اضافه کردن ذرات تقویت کننده در داخل زمینه اصلی (نیکل) ایجاد می‌شوند. پوشش‌های الکترولس کامپوزیتی به وسیله افزودن ذرات میکرومتری و یا نانومتری از قبیل SiC [۳]، PTFE [4]، گرافیت [۵]، نانولوله‌های کربنی [۶] و... به حمام الکترولس تهیه می‌شوند. انتخاب نوع ذره کامپوزیتی در این پوشش‌ها با توجه به کاربرد مورد نظر صورت می‌پذیرد، به طوری که ذرات نرم و روانکار در کاربردهای اصطکاکی و ذرات سخت در کاربردهای سایشی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

گرافین (Graphene) نیز به عنوان جدیدترین آلوتروپ شناخته شده ی کربن، به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد، یکی از بهترین انتخاب‌ها جهت تقویت و بهبود خواص پوشش‌های نانوکامپوزیتی محسوب می‌شود [7]. گرافین متشکل از یک لایه منفرد از اتم‌های کربن با پیوندهای sp^2 است که به صورت فشرده در ساختاری ۲ بعدی در شبکه‌ی شبه لانه زنبوری از اتم‌های کربن در کنار هم قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های برجسته ی گرافین که تا کنون گزارش شده‌اند عبارتند از: مدول یانگ بالا ($\sim 1 \text{ TPa}$)، رسانایی حرارتی فوق العاده ($5000 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$)، رسانایی الکتریکی بالا ($200\ 000 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$)، قابلیت عبور نور ($\sim 97.7\%$) و همچنین مساحت سطح ویژه ی بسیار بالا ($\sim 2630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) [8]. به دلیل این خواص منحصر به فرد، گرافین در زمینه‌های مختلف تکنولوژی از جمله سنسورهای فوق حساس گازی، رساناهای شفاف، صفحات خورشیدی، سلول‌های سوختی و نانوفیلترها کاربرد‌های ویژه ای دارد. همچنین می‌توان گرافین را یکی از بهترین انتخاب‌ها جهت تقویت و بهبود خواص پوشش‌های نانوکامپوزیتی به حساب آورد [9].

هدف از تحقیق حاضر استفاده از نانو صفحات گرافین به عنوان ذرات تقویت کننده برای تولید پوشش نانوکامپوزیتی نیکل-فسفر-گرافین به روش الکترولس بر روی زیرلایه ای از مس است. در ادامه مرفولوژی سطح، ریزساختار و سختی پوشش مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین رفتار تریبولوژیکی پوشش با استفاده از

آزمون پین روی دیسک مورد بررسی قرار گرفت و اثر مشارکت نانو صفحات گرافین در پوشش بر نرخ سایش و ضریب اصطکاک مشخص شد.

مواد و روش تحقیق

جهت ایجاد پوشش کامپوزیتی از نانو ورق های گرافین ۱ تا ۱۰ لایه، ساخت کشور چین و تولید شده به روش رسوب دهی شیمیایی فاز بخار^۱ به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد که مشخصات آن طبق گزارش شرکت سازنده در جدول ۱ ذکر شده است. بدین منظور 20 mg گرافین همراه با 5 mg فعال کننده ی سطحی سدیم دودسیل سولفات به 50ml آب دی یونیز اضافه شد. محلول حاصل با هدف جدایش نانو صفحات و جلوگیری از آگلومراسیون آنها به مدت ۱ ساعت تحت عملیات آلتراسونیک قرار گرفت و سپس ۴۵۰ml محلول الکترولس Ni-P اضافه شد. ترکیب شیمیایی حمام الکترولس حاصل و همچنین شرایط پوشش دهی در جدول 2 آمده است.

برای انجام فرایند پوشش دهی، زیر لایه ی مورد استفاده از جنس مس خالص تجاری به صورت نمونه هایی دیسکی شکل با قطر 40mm و ضخامت 5mm تهیه شد. نمونه ها ابتدا توسط کاغذ سنباده SiC به ترتیب از شماره های ۱۰۰ تا ۱۲۰۰ سنباده زده شده و سپس جهت چربی زدایی به مدت ۱۰ دقیقه تحت عملیات آلتراسونیک قرار گرفتند. پس از آن جهت حذف فیلم های اکسیدی سطحی، نمونه ها به مدت ۱۰ دقیقه در محلول 10% NaOH در دمای 70 °C غوطه ور شده و سپس با آب مقطر شسته شدند. پس از آن به منظور فعال سازی سطحی، نمونه ها به مدت ۲ دقیقه در محلول 5% HCl قرار گرفته و پس از شستشو وارد حمام شدند.

با توجه به ماهیت کاتالیتیکی غیر ذاتی مس، در ابتدای پوشش دهی، یک مفتول فولادی به مدت ۳۰ ثانیه به نمونه ها تماس داده شد تا جوانه های اولیه ی نیکل بر روی مس رسوب کند. پس از ۲ ساعت آبرکاری، هر نمونه با استفاده از میکروکاتر برش داده شده و ضخامت سنجی پوشش با بررسی مقطع عرضی، توسط میکروسکوپ نوری صورت گرفت. پس از آن تعدادی از نمونه ها به مدت ۱ ساعت در دمای 400 °C تحت اتمسفر آرگون عملیات حرارتی شدند. به منظور اندازه گیری سختی سطح پوششهای الکترولس Ni-P و Ni-P-Graphene قبل و بعد از عملیات حرارتی آزمون ریز سختی با استفاده از دستگاه ریزسختی INNOVATEST مدل NEXUS تحت بار ۱۰۰ گرم انجام شد. زمان اعمال بار در هر بار آزمایش ۱۰ ثانیه انتخاب شد. به این ترتیب بر روی هر نمونه پوشش ۵ نقطه سختی سنجی و میانگین مقادیر به دست آمده به عنوان سختی متوسط گزارش شد. همچنین جهت شناسایی فازهای موجود در پوشش، آنالیز پراش اشعه ایکس

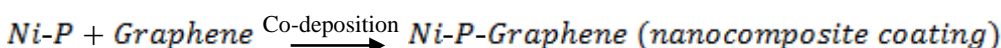
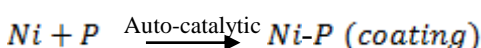
¹- Chemical Vapor Deposition (CVD)

(XRD) توسط دستگاه Philips, X'Pert Pro (گام $0,02$ ، درجه و زمان $0,4$ ثانیه توقف در هر گام) انجام شد.

مرفولوژی سطح پوشش ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Leo 1455 VP و نیز میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدان (FESEM) Tescan مدل MIRA با استفاده از سیگنالهای الکترون های ثانویه مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز طیف نگاری تفکیک انرژی^۱ (EDS) نیز جهت آنالیز عنصری سطح نمونه ها به کار گرفته شد. به منظور بررسی رفتار تریبولوژیکی پوشش ها از آزمون سایش به روش پین روی دیسک^۲ استفاده شد. آزمون سایش در مسافت 800 متر با پین فولادی (65RC) چرخشی و دیسک متحرک تحت بار 15 نیوتن و سرعت چرخش $0,2$ m/s و شعاع چرخش 15 mm انجام شد. این آزمون در شرایط خشک (بدون روانکار) انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

در ابتدای پوشش دهی، تماس مفتول فولادی با سطح نمونه های معلق در حمام الکترولس، الکترون مورد نیاز برای احیای اولین جوانه های نیکل بر روی سطح مس را فراهم می کند و یک لایه ی نازک از پوشش روی سطح زیرلایه را می پوشاند. در ادامه پوشش به صورت اتوکاتالیتیکی و بدون نیاز به جریان خارجی رسوب کرده و نانوصفحات گرافین معلق در حمام در اثر فرایند موسوم به هم رسوبی درون پوشش محبوس می گردند. فرایند این پوشش دهی را می توان مطابق واکنش زیر بیان کرد [10]:



در شکل ۱ الگوی پراش پرتوی ایکس (XRD) پوشش Ni-P-Graphene (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات حرارتی در دمای 400°C به مدت یک ساعت نشان داده شده است. ساختار پوشش های الکترولس Ni-P پیش از عملیات حرارتی ترکیبی از ساختار آمورف همراه با مقدار جزئی ساختاری نانوکریستالی نیکل است. اما پس از عملیات حرارتی در دماهایی بالاتر 200°C ، ساختار به تدریج کریستاله می شود [11]. در نمونه پیش از عملیات حرارتی در 2θ بین 40 تا 50 درجه پیک پهنی مشاهده می شود که نشان دهنده ی ساختار آمورف پوشش همراه با مقدار جزئی فاز نانوکریستالی است. در حین فرایند رسوب گذاری الکترولس Ni-P، اتم های فسفر به صورت تصادفی در میان اتم های نیکل توزیع می شوند و فاقد جهت گیری خاصی هستند. این چینش نامنظم اتم ها به صورت یک پیک پهن در الگوی پراش اشعه ایکس ظاهر می شود [12]. در نمونه ی بعد از

¹- Energy Dispersive Spectroscopy

²- Pin-on-disc

عملیات حرارتی پیک های متعددی ظاهر شده که نشان از کریستاله شدن ساختار پوشش است. دو پیک در زوایای پراش $44/6$ و $51/9$ درجه مشاهده می شود که مربوط به فاز کریستالی نیکل با ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار (FCC) می باشد. سایر پیک ها مربوط به فاز Ni_3P با ساختار کریستالی تتراگونال (BCT) می باشند. در حین عملیات حرارتی ساختار آمورف پوشش که از نظر ترمودینامیکی ناپایدار است تمایل دارد به ساختار پایدارتر و منظم کریستالی تبدیل شود. بنابر این انتظار می رود با افزایش دما ناشی از عملیات حرارتی، مکانیزم های نفوذی فعال شده و طی فرایند تبلور مجدد ترکیب تعادلی از دو فاز کریستالی Ni و Ni_3P تشکیل شود [13].

شکل ۲ تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی 200 برابر از مقطع عرضی پوشش Ni-P-Graphene را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود پوششی به ضخامت حدود ۳۰ میکرون تشکیل شده است. سطح پوشش صاف و یکنواخت و عاری از تخلخل و ترک است. علاوه بر این پیوستگی بسیار خوبی با زیر لایه نیز دارد.

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح پوشش الکترولس Ni-P را بعد از عملیات حرارتی نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود پوشش به صورت متراکم و فشرده و با ساختاری شبه کروی^۱ موسوم به ساختار گل کلمی^۲ رسوب کرده است. چنین ساختاری از مشخصه های معمول پوشش های الکترولس نیکل است [14].

به منظور رؤیت نانو صفحات گرافین محبوس در زمینه پوشش کامپوزیتی، پس از انجام عملیات حرارتی سطح نمونه ی کامپوزیتی به مدت ۲۰ دقیقه در محلول حاوی اسید نیتریک ۱ مولار و اسید سولفوریک ۱ مولار اچ شد. انحلال پوشش Ni-P در این محلول اسیدی امکان رؤیت نانو صفحات گرافین محبوس در عمق پوشش را فراهم می کند. در شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح اچ شده پوشش الکترولس کامپوزیتی Ni-P-Graphene نشان داده شده است. در این تصویر یک جزیره ی گرافینی شفاف با اندازه ی متوسط حدود ۳ میکرون مشاهده می شود. در شکل ۴ نتایج آنالیز نقطه ای EDS از نقطه ی A نیز نشان داده شده است. غلظت بالای کربن در این نقطه وجود گرافین را تایید می کند.

نتایج سختی سنجی پوشش های Ni-P و Ni-P-Graphene قبل و بعد از عملیات حرارتی در شکل ۵ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزودن نانو صفحات گرافین سختی پوشش از ۵۲۱ ویکرز به ۸۴۵ ویکرز افزایش یافته است. طی یک بارگذاری ثابت، با افزایش مشارکت جزء استحکام دهنده در کامپوزیت نقش فاز تقویت کننده در بارپذیری بیشتر می شود [15]. از سوی دیگر نانو صفحات گرافین با استحکام و مدول یانگ بسیار بالای خود در فصل مشترک فلز/گرافین به عنوان مانعی بر سر راه حرکت نابه

¹ -Nodular feature

² -Cauliflower-like structure

جایی ها عمل کرده و از تغییر شکل پلاستیک زمینه جلوگیری می کنند. انجام عملیات حرارتی در دمای 400°C به مدت 1 ساعت سبب افزایش سختی پوشش Ni-P از ۵۲۱ ویکرز به ۹۲۵ ویکرز و افزایش سختی پوشش کامپوزیتی Ni-P-Graphene به میزان ۱۳۹۰ ویکرز شد. افزایش چشمگیر سختی پوشش ها پس از عملیات حرارتی را می توان به رسوب فاز سخت بین فلزی Ni_3P در زمینه نرم نیکلی نسبت داد. همچنین در مورد پوشش کامپوزیتی به نظر می رسد که افزایش سختی پس از عملیات حرارتی بیشتر بوده است. این مسئله را می توان به توزیع مناسب نانو صفحات گرافین در این پوشش و همچنین افزایش چسبندگی در فصل مشترک گرافین/زمینه در اثر عملیات حرارتی نسبت داد. به علاوه این افزایش چشمگیر در سختی پوشش پس از عملیات حرارتی را می توان به دلیل حضور نانو صفحات گرافین در مرزخانه ها دانست. به طوری که نانو صفحات گرافین به عنوان موافقی در برابر حرکت مرزخانه ها در حین عملیات حرارتی عمل کرده و فرایند رشد دانه را به تعویق می اندازند [16].

در جدول ۳ میزان کاهش وزن پوشش Ni-P و پوشش کامپوزیتی Ni-P-Graphene و همچنین میانگین ضریب اصطکاک پوشش ها بعد از آزمون سایش پین روی دیسک در مسافت لغزش ۸۰۰ متر و در شرایط خشک (بدون روانکار) در برابر پین فولادی تحت بار اعمالی ۱۵ نیوتن را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود حضور نانو صفحات گرافین در پوشش Ni-P-Graphene به عنوان فاز تقویت کننده منجر به کاهش قابل ملاحظه در ضریب اصطکاک و بهبود چشمگیر در مقاومت سایشی پوشش کامپوزیتی شده است.

به منظور بررسی مکانیزم های سایش، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدان (FESEM) از سطوح سایش پوشش ها تهیه شد. با بررسی سطح سایش در پوشش Ni-P (شکل ۶ الف) خراشیدگی^۱ و کندگی^۲ پوشش و آثار تغییر فرم پلاستیک در سطح دیده می شود. این شواهد دلالت بر مکانیزم سایش چسبان^۳ و سایش خراشان^۴ دارد که دو مکانیزم غالب در سایش پوشش های Ni-P در برابر فولاد هستند [۱۷]. از طرفی وجود ترک های نسبتاً بزرگ، احتمال وقوع مکانیزم ورقه ای شدن در مراحل اولیه ی سایش و سپس با افزایش مسافت لغزش وقوع سایش چسبان را تقویت می کند. در بررسی سطح سایش پوشش کامپوزیتی Ni-P-Graphene (شکل ۶ ب) مشاهده می شود که تغییر شکل پلاستیک تا حد زیادی کاهش یافته و ترک های متعددی در سرتاسر مسیر سایش گسترش یافته اند. در این پوشش حضور نانو صفحات گرافین، سبب افزایش استحکام و کاهش تغییر شکل پلاستیک زمینه میشود. از طرفی دیگر انتظار می رود که وجود پیوند در فصل مشترک گرافین/زمینه، از توسعه ی ترک ها و جدا شدن پوشش به صورت ورقه ای جلوگیری کرده یا حداقل

1 - Scuffing

2 - Peeling

3 - Adhesive wear

4 - Abrasive Wear

آن را به تعویق اندازد و به این ترتیب با کاهش تغییر شکل پلاستیک از مکانیزم سایش چسبان و به دنبال آن سایش خراشان جلوگیری می کند.

به طور کلی بهبود چشمگیر در رفتار تریبولوژیکی پوشش کامپوزیتی تقویت شده با گرافین را علاوه بر نقش گرافین در افزایش استحکام زمینه، می توان به مکانیزم های دیگری نیز نسبت داد که در زیر به آنها اشاره شده است:

الف) ساختار لایه ای گرافین این قابلیت را ایجاد می کند که نانو صفحات گرافین که از طریق پیوند های ضعیف واندروالس بر روی هم قرار گرفته اند در اثر اعمال نیروی برشی ناشی از جفت سایشی به آسانی بر روی یکدیگر لغزیده و با ایجاد خاصیت خودروانکاری، شرایط سایش را تحت تأثیر قرار داده و ضریب اصطکاک پوشش کامپوزیتی را کاهش می دهند. [18].

ب) در حین تست سایش لایه ای از کربن بی شکل در فصل مشترک جسم ساینده و سطح کامپوزیت تشکیل می شود که این لایه محافظ با کاهش ضریب اصطکاک منجر به بهبود رفتار اصطکاکی کامپوزیت می شود [۱۹].

ج) نانو صفحات گرافین موجود در سطح پوشش به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالای خود می توانند گرمای ایجاد شده در طول فرایند سایش را به سرعت به زیر لایه انتقال داده و با جلوگیری از افزایش دما در سطح سایش، از خوردگی سایشی^۱ جلوگیری کرده و سبب کاهش نرخ سایش شوند [20].

نتیجه گیری

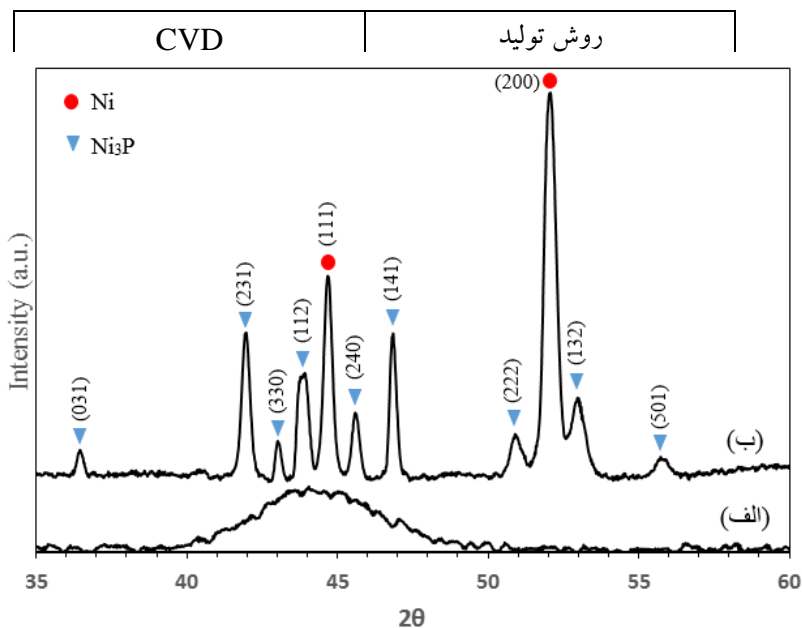
- ۱- پوشش نانو کامپوزیتی Ni-P-Graphene از یک محلول الکترولس حاوی گرافن با موفقیت بر روی زیر لایه مسی رسوب داده شد.
- ۲- پوشش الکترولس نانو کامپوزیتی Ni-P-Graphene پوششی با ضخامت یکنواخت بوده و عاری از تخلخل و ترک است.
- ۳- عملیات حرارتی پوشش ها در دمای ۴۰۰ درجه ی سانتی گراد به مدت ۱ ساعت منجر به رسوب فاز سخت فسفید نیکل در زمینه و افزایش قابل توجه سختی پوشش ها شد. و به این ترتیب سختی پوشش Ni-P به ۹۲۴ ویکرز و سختی پوشش Ni-P-Graphene به ۱۳۹۰ ویکرز افزایش یافت.
- ۴- مقاومت سایشی پوشش نانو کامپوزیتی Ni-P-Graphene نسبت به پوشش Ni-P تا ۹۷ درصد افزایش یافت. همچنین به دلیل مشارکت نانو صفحات گرافین در پوشش نانو کامپوزیتی، میانگین ضریب اصطکاک پوشش نسبت به پوشش Ni-P تا ۵۰ درصد کاهش یافته و به میزان ۰/۳۶ رسید.

^۱ -Tribo-corrosion

مراجع

- [1] Riedel, W., *Electroless nickel plating*, ASM International, Ohio, 1991.
- [2] Kanani, N., *Electroplating- Basic Principles, Processes and Practice*, Elsevier Ltd., Berlin, 2004.
- [3] Wu, Y., Shen, B., Hu, W., "The tribological behavior of electroless Ni-P-Gr-Sic composite", *Wear.*, Vol.261, pp.201-207, 2006.
- [4] Gutsev, D., Antonov, M., Hussainova, I., "Effect of SiO₂ and PTFE additives on dry sliding of Ni-P electroless coating", *Tribology International*, Vol.65, pp.295-302, 2013 .
- [5] Cheng, L., "Electroless Ni-Cu-P/nano-graphite composite coatings for bipolar plates of proton exchange membrane fuel cells", *Power Source.*, Vol.220, pp.130-137, 2012.
- [6] Alishahi, M., Monirvaghefi, S.M., Saatchi, A., Hoseini, S.M., "The effect of carbon nanotube on the corrosion and tribological behavior of electroless Ni-P-CNT composite coating", *Applied Surface Science.*, Vol.258, pp.2439-2446, 2012.
- [7] Akhavan, O., "The effect of heat treatment on formation of graphene thin films from graphene oxide nanosheets", *CARBON*, Vol.48, pp.509-519, 2010.
- [8] Zhu, Y., Murali, S., "Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications", *Adv. Mater.*, Vol.22, pp.3906-3924, 2010.
- [9] Singh, V., et al, "Graphene based materials: Past, present and future", *Progress in Materials Science*, Vol. 56, pp.1178-1271, 2011.
- [10] Yang, Z., et al, "The fabrication and corrosion behavior of electroless Ni-P-carbon nanotube composite coatings", *Materials Research Bulletin*, Vol.40, pp.1001-1009, 2005.
- [11] Jiaqiang, G., et al, "Crystallization temperature of amorphous electroless nickel-phosphorus alloys", *Materials Letters*, Vol.59, pp.1665-1669, 2005.
- [12] Bunshah, R., *Handbook of deposition technologies for films and coatings*, Noyes Publications, Second Edition, Los Angeles, 1994.
- [13] Guo, Z., et al, "Crystallisation and phase transformation behaviour of electroless nickel phosphorus platings during continuous heating", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.358, pp.112-119, 2003.
- [14] Sahoo, P., Das, S.K., "Tribology of electroless nickel coatings", *Materials and Design*, Vol.32, pp.1760-1775, 2011.
- [15] Chawla, N., Shen, Y, L., "Mechanical Behavior of Particle Reinforced Metal Matrix Composites", *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS*, Vol.3, No.6, pp.357-370, 2001.
- [16] Zhai, W., Shi, X., Wang, M., et al., "Grain refinement: A mechanism for graphene nanoplatelets to reduce friction and wear of Ni₃Al matrix self-lubricating composites", *Wear*, Vol.31, pp. 33-40, 2014.
- [17] Palaniappa. M., Seshadri. S. K., "Friction and wear behavior of electroless Ni-P and Ni-W-P alloy coatings", *Wear*, Vol.265, pp.735-740, 2008.
- [18] Berman. D, et al, "Graphene: a new emerging lubricant", *Materials Today*, Vol.17, No.1, pp.31-42, 2014.
- [19] Tong. Y, et al, "Graphene based materials and their composites as coatings", *Austin Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, Vol.1, pp.10-26, 2013.
- [20] Das, A., Harimkar, S.P., "Effect of Graphene Nanoplate and Silicon Carbide Nanoparticle Reinforcement on Mechanical and Tribological Properties of Spark Plasma Sintered Magnesium Matrix Composites", *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol.30, pp.1059-1070, 2014.

جدول ۱: مشخصات
گرافین مورد استفاده
عنوان فاز تقویت
کننده



ب.

شیمیایی حمام
پوشش دهی

25 (g/l)	سولفات نیکل
23 (g/l)	هیپوفسفید سدیم
10 (g/l)	استات سدیم
20 (ml/l)	اسید لاکتیک ۸٪
4/6-4/8	PH
85-90 C°	دما
5 (mg/l)	فعال کننده سطح (Sodium Dodecyl Sulfate)
20 (mg/l)	گرافین

جدول ۲: ترکیب
الکترولس و شرایط

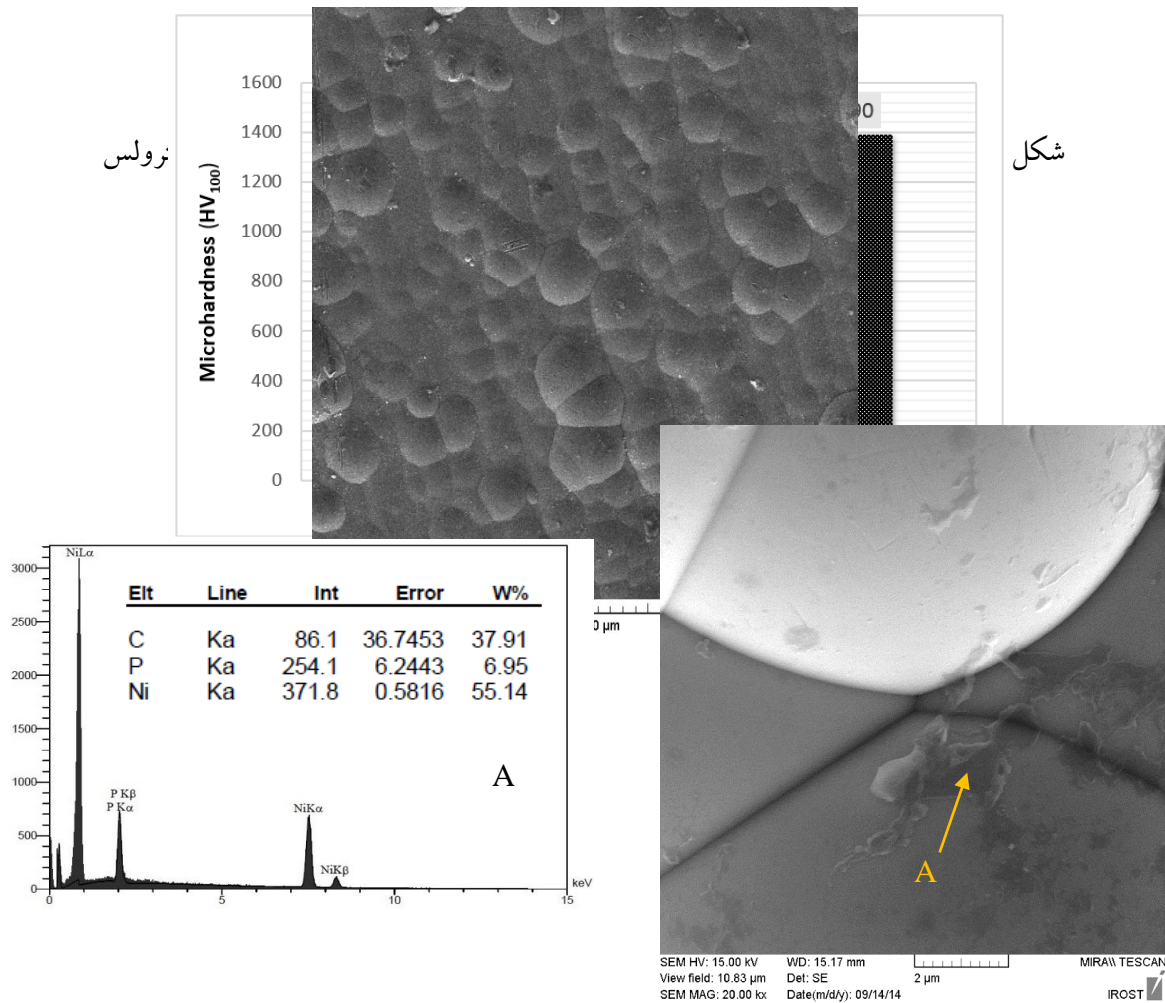
ارزیابی ریزساختار، سختی و خواص تریبولوژیکی پوشش الکترولس نانوکامپوزیتی Ni-P-Graphene

شکل ۱: الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) پوشش Ni-P-Graphene (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات حرارتی



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی پوشش Ni-P-Graphene





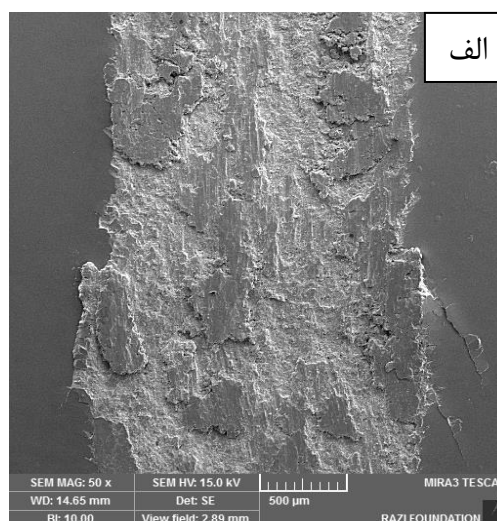
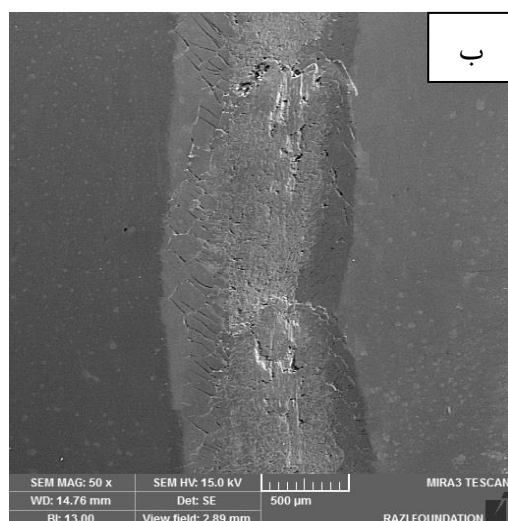
شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح اچ شده پوشش الکتروکترولس کامپوزیتی Ni-P-Graphene و نیز نتایج میکرو آنالیز EDS از نقطه A

شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح اچ شده پوشش الکتروکترولس کامپوزیتی Ni-P-Graphene

شکل ۵: نمودار ستونی تغییرات ریزسختی پوشش های Ni-P و Ni-P-Graphene

جدول ۳: میزان کاهش وزن و میانگین ضریب اصطکاک در پوشش Ni-P و Ni-P-Graphene پس از طی مسافت لغزش ۸۰۰ متر در تست سایش پین روی دیسک

پوشش	کاهش وزن دیسک (میلی گرم)	میانگین ضریب اصطکاک (μ)
Ni-P	32/8	0/73
Ni-P-Graphene	0/9	0/36



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدان (FESEM) از سطح سایش پوشش الکترولس

الف) Ni-P ب) Ni-P-Graphene