

اثر غلظت نانولوله‌های کربنی روی مقاومت سایشی پوشش‌های نیکل-بور-نانولوله کربنی

سپهر یزدانی^۱، فرزاد محیوبی^{۲*}

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲ استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران



تاریخ دریافت:

۹۷/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش:

۹۸/۰۱/۱۷

چکیده

در این مقاله، پوشش نیکل-بور-نانولوله کربنی با غلظت‌های مختلف نانولوله‌های کربنی روی فولاد AISI 4140 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 و آزمون سختی 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 نانولوله‌های کربنی ساختار پوشش از حالت آمورف به حالت شبه-بلوری تغییر می‌یابد. علاوه بر این تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نتایج حاصل از آزمون سختی نشان می‌دهد که اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به حمام الکترولس سبب افزایش سختی و ضخامت پوشش می‌گردد. اضافه کردن نانولوله‌های کربنی تا غلظت ۱ gr/lit باعث بهبود رفتار مقاومت سایشی و کاهش ضریب اصطکاک شد. با این وجود افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی تا ۱ gr/lit بدلیل آگلومره شدن نانولوله‌های کربنی سبب افزایش نرخ سایش ویژه پوشش شد.

نانولوله‌های کربنی، سایش، ضریب اصطکاک، پوشش

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

پوشش‌های الکترولس نیکل-بور به دلیل قیمت ارزان و قابلیت پوشش دهی یکنواخت کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنعت یافته است [۱،۲]. این پوشش‌ها به سه گروه مختلف تمیز تقسیم می‌شوند: نیکل خالص، نیکل-بور، نیکل-فسفر. فرایند پوشش‌دهی برای هر یک از این گروه‌ها درون حمامی با عامل کاهنده منحصر بفرد انجام می‌شود. از عامل کاهنده هیدرازین برای نیکل، هیپوفسفیته برای نیکل-فسفر و بور و هیدرید سدیم یا دی متیل آمین بورن برای نیکل-بور استفاده می‌شود [۳،۴]. 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. خواص مکانیکی خوب و مقاومت به سایش بالای این پوشش‌ها سبب کاربرد گسترده این پوشش‌ها در صنایع پتروشیمی، اتومبیل، نساجی و هوافضا شده است [۵،۶].

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 ۶-۵ 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 [۷]. تحقیقات نشان می‌دهد ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی با اضافه کردن ذراتی مانند: WC، Al_2O_3 ، TiO_2 ، SiC سبب افزایش مقاومت در برابر سایش و بهبود خواص مکانیکی پوشش‌ها می‌گردد [۸-۱۱]. با این وجود این ذرات به دلیل سختی بسیار بالا سبب ایجاد یک فصل مشترک غیرهمدوس با زمینه و ایجاد ترک می‌گردند. گروه دیگری از ذرات نیز مانند نانولوله‌های کربنی و PTFE وجود دارند که با اضافه شدن به ساختار بعنوان روانکار عمل می‌کنند و ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهند [۱۰].

نانولوله‌های کربنی، ساختارهای حلقوی تو خالی و متشکل از اتم‌های کربن هستند که به دلیل خواص ویژه و منحصر به فرد آن از جمله مدول یانگ بالا و استحکام کششی مناسب توجه محققان را به سمت خود جلب کرده‌اند. با این وجود بالا بودن نسبت طول به قطر این نانولوله‌ها سبب آگلومره شدن آن‌ها می‌گردد که خواص مکانیکی نامطلوبی را بوجود می‌آورد. آسیاب کاری گلوله‌ای، اضافه کردن مواد فعال سطحی و اکسید کردن نانولوله‌های کربنی از جمله عملیات‌هایی است که سبب جلوگیری از آگلومره شدن آن‌ها می‌گردد [۱۲،۱۳].

مواد فعال سطحی به دو گروه عمده یونی و غیر یونی تقسیم می‌شوند. در بخش یونی مواد فعال سطحی شامل دو گروه آنیونی و کاتیونی می‌باشند. این آنیون‌ها و کاتیون‌ها با اعمال نیروی دافعه به دو سر نانولوله‌های کربنی سبب بهبود پخش شدن آن‌ها در محلول آبی می‌گردند. مواد فعال سطحی غیر یونی نیز به دلیل دارا بودن شاخه آبدوست سبب بهبود پخش نانولوله‌های کربنی در محلول آبی می‌

شوند [۱۴،۱۵].

روش دیگر برای بهبود پخش شدن نانولوله‌های کربنی در محلول آبی اکسید کردن آن‌ها با کمک اسید می‌باشد. در این روش گروه‌های عاملی مانند: کربوکسیل، کربونیل، هیدروکسیل به دیواره نانولوله‌های کربنی اضافه می‌گردد که از آگلومره شدن آن‌ها جلوگیری می‌کند. فرایند اکسیداسیون نانولوله‌های کربنی می‌تواند در محلول‌های اسیدی حاوی عوامل اکسیدزا مانند: H_2SO_4 ، HNO_3 ، H_2SO_4 و HNO_3 / $KMnO_4$ انجام شود [۱۶].

تحقیقاتی که روی پوشش‌های الکترولس و نانولوله‌های کربنی صورت گرفته نشان می‌دهد که افزودن نانولوله‌های کربنی در ساختار سبب بهبود خواص سایشی و خوردگی پوشش می‌گردد. علیشاهی و همکارانش [۱۷] در بررسی خواص سایشی و خوردگی پوشش‌های نیکل-فسفر-نانولوله کربنی نشان داده‌اند که نانولوله‌های کربنی بدلیل فعالیت شیمیایی پایین و سرعت بخشیدن به تشکیل لایه پسیو سبب بهبود مقاومت به خوردگی پوشش می‌گردند. علاوه بر این گزارش شده است که وجود نانولوله‌های کربنی در ساختار پوشش‌های نیکل-فسفر سبب افزایش سختی پوشش و بهبود رفتار سایشی آن می‌گردد [۱۸]. ونگ و همکارانش [۱۹] نیز در مقایسه خواص سایشی پوشش الکترولس نیکل و پوشش نیکل-نانولوله کربنی به این نتیجه رسیده‌اند که مشارکت نانولوله‌های کربنی در ساختار پوشش بدلیل خاصیت روانکاری آن‌ها سبب کاهش نرخ سایشی پوشش تا حدود ۲ برابر می‌گردد. برخی دیگر از محققان نیز نشان داده‌اند که نانولوله‌های کربنی بدلیل ریز دانه کردن ساختار پوشش سبب افزایش مقاومت در برابر سایش پوشش می‌گردد [۲۰].

هدف از این پژوهش بررسی اثر غلظت‌های مختلف نانولوله‌های کربنی رو خواص ساختاری، سختی و مقاومت سایشی پوشش‌های نیکل-بور-نانولوله کربنی می‌باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

در این پژوهش نمونه‌های استوانه‌ای از جنس فولاد AISI 4140 به عنوان زیرلایه مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بهبود خواص مکانیکی مانند سختی، نمونه‌ها ۳۰ دقیقه در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد آستنیت‌شدند و سپس بلافاصله در روغن سرد شدند. سپس، به منظور تمپر شدن در دمای ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفتند. سطوح 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 به منظور فعال‌سازی سطح آن‌ها برای پوشش دهی به مدت یک دقیقه در داخل محلول هیدروکلریک اسید قرار داده شدند.

۲-۲- عاملدار کردن نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNT) با خلوص ۹۵٪، طول ۱۰ تا ۳۰ میکرومتر و قطر خارجی ۲۰-۱۰ نانومتر، از شرکت US Research Nanomaterials خریداری شد. نانولوله‌ها برای مدت ۲ ساعت با استفاده از یک دستگاه آسیاب گلوله ای با گلوله های ZrO_2 (شعاع: ۵ میلی متر، وزن: ۳ گرم) و محفظه فولاد زنگ نزن استوانه ای با حجم ۲۵۰ سی سی آسیاب کاری شد. نسبت وزنی توپ به نسبت وزنی پودر ۲۰ به ۱ بود و سرعت چرخش آسیاب ۳۰۰ دور در دقیقه بود.

در نهایت، نانولوله‌ها در محلول HNO_3 / H_2SO_4 با نسبت حجمی ۱:۳ به مدت ۳ ساعت در دستگاه اولتراسونیک (Euronda 4D، ۳۵۰ وات) عاملدار شدند. سپس، آنها در کاغذ فیلتر با استفاده از فیلتر خلاء جمع آوری شده و با آب مقطر شستشو داده شدند تا زمانی که اسیدیته محلول خنثی شود. محصول نهایی در یک کوره خلاء در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد خشک گردید.

۲-۳- فرآیند پوشش دهی نمونه‌ها

نمونه‌ها بعد از آماده سازی به منظور پوشش دهی به مدت ۱ ساعت در حمام الکترولس با ترکیب ذکر شده در جدول ۱ قرار گرفتند. حمام الکترولس به کمک همزن مغناطیسی در زمان پوشش دهی هم زده شد. دمای پوشش دهی به کمک دماسنج جیوه ای در ۹۰ درجه سانتی گراد تنظیم شد و در مدت زمان پوشش دهی در همین دما نگه داشته شد. به دلیل وجود بخارات سمی حاصل شده در حین پوشش دهی، کلیه عملیات الکترولس در زیر هود انجام گرفت.

با در نظر گرفتن شرایط پوشش دهی نیکل-بور مقادیر ۰/۲ gr/lit و ۱ gr/lit و ۰/۶ lit و ۱ gr/lit نانولوله کربنی ابتدا در حمام التراسونیک قرار گرفتند و سپس به حمام آبکاری نیکل-بور اضافه گشتند.

جدول ۱: ترکیبات و شرایط حمام الکترولس استفاده شده برای پوشش دهی.

غلظت	ترکیبات حمام
25 gr/Lit	$NiCl_2 \cdot 6H_2O$
30 gr/Lit	$C_2H_8N_2$
0.02 gr/Lit	$Pb(NO_3)_2$
39 gr/Lit	NaOH
0.6 gr/Lit	$NaBH_4$
مقدار	شرایط حمام
500 cc	حجم حمام
14	pH
$95 \pm 1^\circ C$	دما
60 دقیقه	زمان آبکاری

۲-۴- مشخصه یابی نمونه‌ها

طول نانولوله‌های کربنی و ساختار آن‌ها با کمک میکروسکوپ الکترونی MIRA3 TESCAN مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی گروه های عاملی نانولوله‌های کربنی به کمک آزمون مشخصه یابی FTIR مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی ساختار بلوری پوشش‌ها از آزمون پراش اشعه ایکس با طول موج $Cu K\alpha$ ($\lambda=1.54187 \text{ \AA}$) استفاده گشت.

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 TR200 استفاده گشت و مقدار میانگین حاصل از ۱۰ اندازه گیری گزارش شد.

به منظور بررسی خواص سایشی نمونه‌ها از دستگاه پین روی دیسک مطابق با استاندارد ASTM G99 استفاده گشت. پین مورد استفاده در این آزمایش از جنس فولاد AISI 52100 با قطر ۵ میلی متر و سختی ۶۲ راکول سی بود. آزمایش سایش با اعمال نیروی عمودی ۱۰ نیوتن، سرعت لغزش $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ و مسافت ۵۰۰ متر انجام گشت. دمای اتاق در طول آزمون ۲۵ درجه سانتی گراد و میزان رطوبت هوا ۴۰ درصد بوده است. دیگرام ضریب اصطکاک بر حسب مسافت توسط دستگاه ضبط گشت و سطح ساییده شده نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی و مشخصه‌یابی EDS مورد بررسی قرار گرفت. مقدار وزن نمونه‌ها قبل و بعد از سایش توسط ترازو با دقت ۰/۱ میلی گرم اندازه گیری شد و نرخ سایش ویژه نمونه‌ها مطابق با فرمول زیر محاسبه گشت.

$$w_s = \frac{m}{d \times F} \quad (1)$$

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

۳- نتایج آزمایشات و بحث

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در اثر فرآیند آسیاب کاری طول نانولوله‌های کربنی به طور قابل توجهی کاهش یافته است. این امر بدلیل انرژی برخورد بالای گلوله‌ها می باشد که سبب می شود نانو لوله‌ها شکسته و تیز شوند.

عاملدار کردن نانولوله‌های کربنی در حمام التراسونیک میزان اکسیداسیون را با ایجاد نیروی برشی روی آن افزایش می‌دهد. یون نوتریم (NO_2^+) محصول واکنش بین اسید سولفوریک و اسید نیتریک می باشد که باعث شکستن پیوندهای کربن با کربن در نانولوله‌های کربنی و در نهایت ایجاد گروه‌هایی مانند هیدروکسیل، کربوکسیل و کربونیل در دیواره نانولوله‌ها شود. این واکنش می تواند عیوب زیادی در دیوار نانولوله‌های کربنی تولید کند.

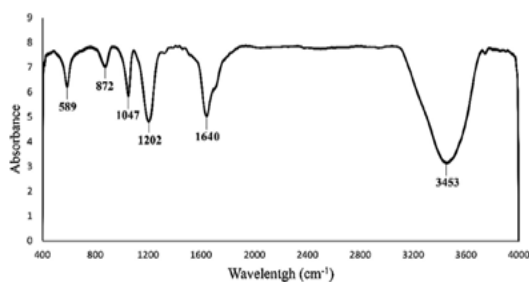
طیف FTIR حاصل از نانولوله‌های کربنی عاملدار شده در شکل

به حالت شبه-بلوری بیان کرده‌اند [۲۵]. بنابراین می‌توان به این نتیجه دست یافت که با افزایش نانولوله‌های کربنی در ساختار آرایش اتم‌ها تغییر می‌کند و یک حالت شبه-بلوری را بوجود می‌آورند. علت این امر این است که نانولوله‌های کربنی بعنوان یک عامل احیا کننده برای نیکل عمل می‌کنند. در واقع اتم‌های نیکل شروع به جوانه زنی در محل عیوب نانولوله‌ها می‌کنند که سبب می‌شود سرعت جوانه زنی و رشد نیکل افزایش یابد و ساختار به حالت شبه-بلوری تبدیل گردد. گوو و همکارانش [۲۶] در تحقیقات خود بیان کرده‌اند که نانولوله‌های کربنی 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 احیا کنندگی بالایی دارد و می‌تواند باعث احیای یون‌های نیکل حمام شود که در نتیجه آن تعداد جوانه‌های بیشتری از نیکل روی پوشش ایجاد می‌شود. 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 نانولوله‌های کربنی می‌باشد.

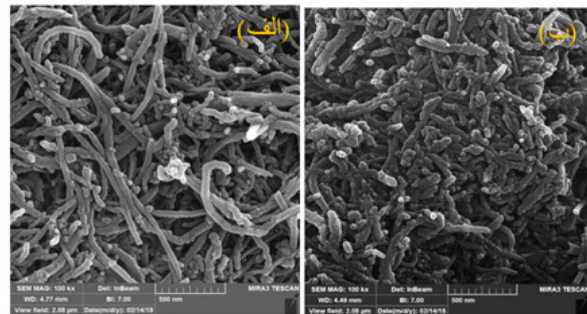
شکل شماره ۴ تصاویر سطح مقطع پوشش‌ها را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی میزان ضخامت پوشش افزایش یافته است. در واقع علت افزایش ضخامت پوشش افزایش سرعت لایه نشانی اتم‌های نیکل در حضور نانولوله‌های کربنی می‌باشد. همانگونه که در قسمت

۲ نشان داده شده است. پیک پهن ایجاد شده در طول موج cm^{-1} ۳۴۵۳ بیانگر ایجاد گروه عاملی هیدروکسید می‌باشد و پیک مشاهده شده در طول موج cm^{-1} ۱۶۴۰ نشان دهنده گروه عاملی کربونیل می‌باشد [۲۲،۲۱]. نتایج حاصل از آزمایش FTIR نشان می‌دهد که نانولوله‌های کربنی به درستی در طی فرآیند عاملدار شده‌اند.

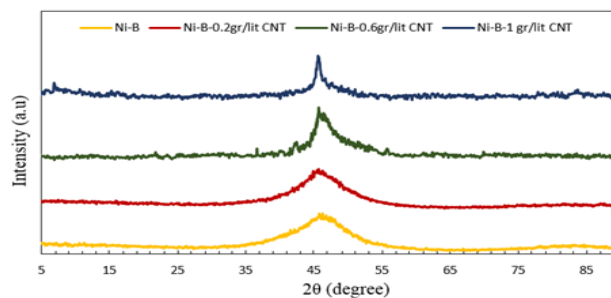
نتایج حاصل از آزمون پراش اشعه ایکس پوشش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود پوشش نیکل-بور شامل یک پیک پهن در زاویه ۴۵ درجه می‌باشد. این پیک مربوط به پراش صفحه (۱۱۱) فاز نیکل می‌باشد. وجود این پیک پهن بیانگر این است که ساختار پوشش بصورت آمورف است. علت آمورف بودن ساختار این پوشش وجود اتم‌های بور می‌باشد که از جوانه زنی اتم‌های نیکل به صورت منظم جلوگیری می‌کند [۲۳]. اما همانگونه که مشاهده می‌شود با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی پهنای پیک کاهش یافته است. کاهش پهنای پیک در نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی نشان می‌دهد که ساختار پوشش از حالت آمورف به حالت شبه-بلوری تغییر یافته است. همانگونه که ویتری و همکارانش [۲۴] 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 به حمام نیکل-بور توسط محققان مشاهده شده است که آن‌ها نیز علت کاهش پهنای پیک پوشش نیکل-بور را تبدیل ساختار بلوری پوشش از حالت آمورف



شکل ۲: طیف FTIR نانولوله‌های کربنی پس از عاملدار کردن.



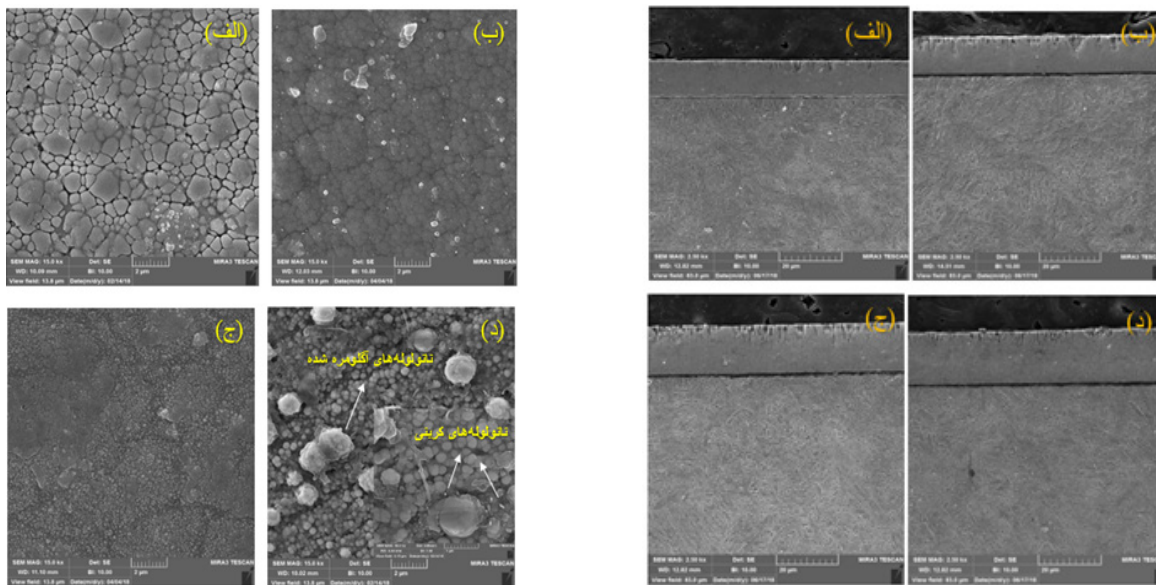
شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی نانولوله‌های کربنی (الف) قبل از بال میل (ب) بعد از بال میل.



شکل ۳: الگوی اشعه ایکس نمونه‌های پوشش داده شده.

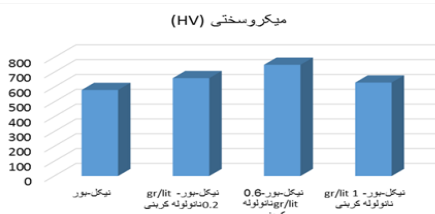
نانولوله‌ها کاملاً مشهود است که بدلیل غلظت بالای آن نسبت به نمونه‌های دیگر می‌باشد (شکل ۵د). علاوه براین همانگونه که مشاهده می‌شود نانولوله‌ها در این نمونه آگلومره شده‌اند. شکل شماره ۶ نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی تا غلظت 0.6 gr/lit سبب افزایش سختی پوشش تا مقدار 750 ویکرز می‌گردد. علت این امر این است که نانولوله‌های کربنی بعنوان یک عامل کامپوزیت ساز سبب افزایش خواص مکانیکی ماتریکس نیکل می‌گردند. در واقع افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی سبب ایجاد توزیع یکنواخت تری از آن‌ها در زمینه نیکلی و افزایش سختی می‌گردد. با این وجود همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی تا غلظت 1 gr/lit باعث کاهش سختی پوشش به مقدار 630 ویکرز شده است. علت این امر می‌تواند بدلیل آگلومره شدن نانولوله‌های کربنی در غلظت بالا باشد که سبب ایجاد یک فصل مشترک غیرهمدوس با زمینه و

آزمایش اشعه ایکس بیان شد نانولوله‌های کربنی بعنوان یک عامل احیا کننده نرخ لایه نشانی اتم‌های نیکل را افزایش می‌دهد که این امر سبب افزایش ضخامت پوشش می‌گردد. شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود سطح پوشش نیکل-بور دارای ترک می‌باشد. این ترک‌ها بدلیل آزاد شدن گاز هیدروژن در حمام در ساختار بوجود آمده‌اند (شکل ۶الف). با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی مقدار این ترک‌ها کاهش یافت و احتمالاً بخاطر این است که نانولوله‌های کربنی می‌توانند در این ترک‌ها تعبیه شوند. دیده شدن نانولوله‌های کربنی در پوشش‌های حاوی 0.2 gr/lit و 0.6 gr/lit نانولوله کربنی مشکل است چون همانگونه که بیان شد مقدار زیادی از نانولوله‌های کربنی میان ساختار تعبیه می‌شوند (شکل ۶ب و ج). با این وجود کاهش مقدار ترک‌های ساختار و تغییر ریزساختار پوشش می‌تواند دلیلی قاطع برای حضور نانولوله‌های کربنی در ساختار این نمونه‌ها باشد. همچنین در نمونه حاوی 1 gr/lit حضور



شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح نمونه‌های (الف) نیکل-بور، (ب) نیکل-بور - 0.2 gr/lit نانولوله کربنی، (ج) نیکل-بور - 0.6 gr/lit نانولوله کربنی، (د) نیکل-بور - 1 gr/lit نانولوله کربنی

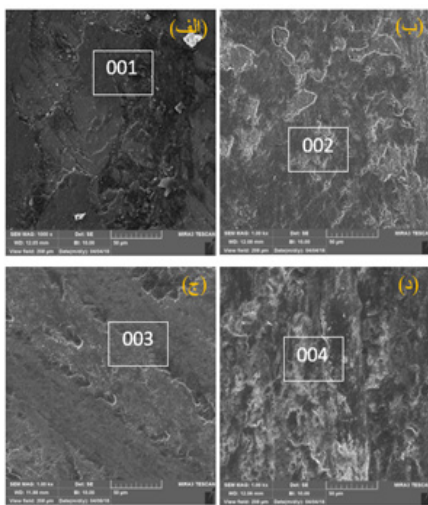
شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح مقطع نمونه‌های (الف) نیکل-بور، (ب) نیکل-بور - 0.2 gr/lit نانولوله کربنی، (ج) نیکل-بور - 0.6 gr/lit نانولوله کربنی، (د) نیکل-بور - 1 gr/lit نانولوله کربنی



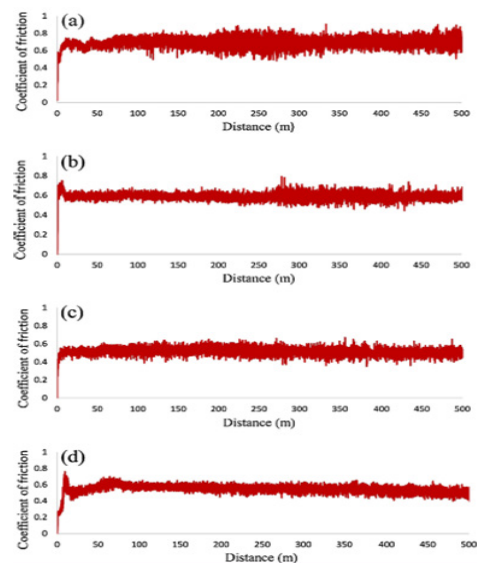
شکل ۶: نتایج میکروسختی نمونه‌های پوشش داده شده.

آمورف پوشش در حین آزمون سایش باشد. در واقع در حین آزمون سایش گرمای شدید در پوشش تولید می‌شود که انرژی محرکه مناسبی برای بلوری شدن پوشش می‌باشد و بنابراین قسمت‌هایی از پوشش بلوری می‌شود. وجود فازهای بلوری و آمورف در کنار هم سبب ایجاد ترک و کندگی شدید پوشش می‌شود و در نتیجه نوسانات نمودار ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. مقدار میانگین ضریب اصطکاک با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی تا غلظت 0.6 gr/lit کاهش یافت. علت این امر این است

کاهش خواص مکانیکی پوشش می‌گردد. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب فاصله نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان نوسانات نمودار پوشش نیکل-بور بدون حضور نانولوله‌های کربنی بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. در واقع علت این نوسانات قابلیت انحلال بالای آهن (پین) در نیکل (پوشش) می‌باشد که سبب کندگی شدید پوشش و ایجاد نوسانات شدید در نمودار ضریب اصطکاک می‌شود. علت دیگر این امر می‌تواند بدلیل بلوری شدن ساختار



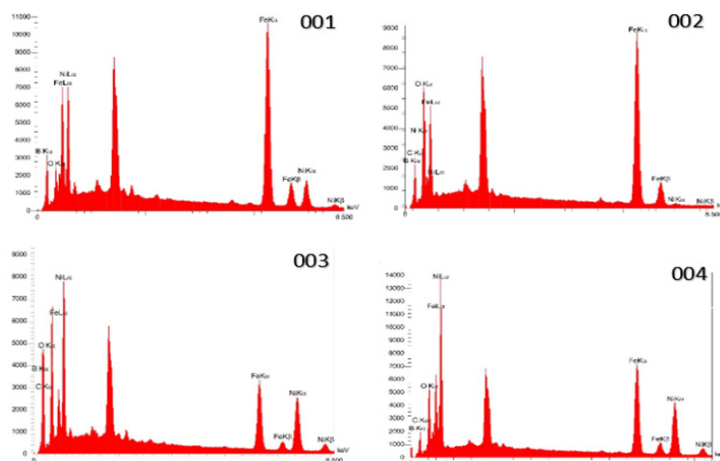
شکل ۸: تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده نمونه‌های (الف) نیکل-بور، (ب) نیکل-بور- 0.2 gr/lit نانولوله کربنی، (ج) نیکل-بور- 0.6 gr/lit نانولوله کربنی، (د) نیکل-بور- 1 gr/lit نانولوله کربنی.



شکل ۷: نمودار ضریب اصطکاک بر حسب فاصله نمونه‌های (a) نیکل-بور، (b) نیکل-بور- 0.2 gr/lit نانولوله کربنی، (c) نیکل-بور- 0.6 gr/lit نانولوله کربنی، (d) نیکل-بور- 1 gr/lit نانولوله کربنی.

جدول ۲: نتایج آزمون سایش نمونه‌های پوشش داده شده.

نمونه	ضریب اصطکاک	جرم از دست رفته (mg)	نرخ سایش ویژه $\times 10^{-6} (\text{kg} / \text{N.m})$
نیکل-بور	0.6943	3.5	7E-4
نیکل-بور- 0.2 gr/lit نانولوله کربنی	0.5901	2.4	4.8E-4
نیکل-بور- 0.6 gr/lit نانولوله کربنی	0.5143	2.1	4.2E-4
نیکل-بور- 1 gr/lit نانولوله کربنی	0.5468	2.8	5.6E-4



شکل ۹: نتایج آزمایش EDS نمونه‌ها.

که در واقع نانولوله‌های کربنی بعنوان روانکار در پوشش عمل می‌کند و از تماس مستقیم بین با پوشش جلوگیری می‌کند. یکی دیگر از عوامل مهم در کاهش ضریب اصطکاک سختی پوشش می‌باشد. همانگونه که در قسمت قبل بیان شد با افزایش نانولوله‌های کربنی سختی پوشش افزایش می‌یابد 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. در نمونه حاوی غلظت ۱ gr/lit نانولوله کربنی همانگونه که در شکل ۷ دیده می‌شود در ۵۰ متر اولیه مسیر سایشی ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. علت این امر می‌تواند کنده شدن ذرات آگلومره نانولوله‌های کربنی باشد که پیوند بسیار ضعیفی با ماتریکس زمینه دارند و کنده شدن آن‌ها باعث افزایش نرخ سایش و افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. پس از این که این ذرات کنده شدند با اکسیژن موجود در هوا واکنش می‌دهند و ذرات اکسیدی را تولید می‌کند که از تماس مستقیم بین با پوشش جلوگیری می‌کند و ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر غلظت نانولوله‌های کربنی روی خواص ساختاری و مقاومت سایشی پوشش‌های نیکل-بور-نانولوله کربنی بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی ساختار پوشش از حالت آمورف به حالت شبه-بلوری تغییر می‌کند. همچنین ضخامت پوشش‌ها با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی افزایش یافت. نتایج حاصل از آزمون سایش نشان داد که غلظت نانولوله‌های کربنی روی مقاومت سایشی پوشش تاثیر می‌گذارد و بعنوان یک ماده روانکار باعث کاهش ضریب اصطکاک و کاهش نرخ سایش ویژه می‌گردد. با این وجود غلظت زیاد نانولوله‌های کربنی باعث افت مقاومت سایشی پوشش گشت که احتمالاً بدلیل آگلومره شدن آن‌ها رخ داده بود.

جدول شماره ۲ مقدار میانگین ضریب اصطکاک، مقدار جرم از دست رفته پوشش حین سایش و نرخ سایش ویژه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نرخ سایش ویژه ارتباط مستقیمی با ضریب اصطکاک دارد و در نمونه‌هایی که ضریب اصطکاک آن‌ها کم بوده است نرخ سایش ویژه کم شده است. کمترین میزان نرخ سایش ویژه برای نمونه حاوی ۰/۶ gr/lit نانولوله کربنی بدست آمده است. علت این امر سختی بالای این نمونه، ضریب اصطکاک کم و احتمالاً توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی در ساختار این پوشش می‌باشد.

شکل شماره ۸ 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 انحلال پذیری بالای آهن موجود در بین با نیکل موجود در پوشش می‌باشد. در واقع انحلال شدید این دو عنصر سبب ایجاد جوش موضعی بین بین و سطح پوشش می‌شود که در اثر چرخش‌های مکرر بین روی سطح نمونه کندگی شدیدی را ایجاد می‌کند. از روی تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده پوشش نیکل-بور می‌توان به این نتیجه دست یافت که مکانیزم سایش در این نمونه از نوع سایش چسبان می‌باشد. با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی تا غلظت ۰/۶ gr/lit همانطور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی دیده می‌شود میزان کندگی موجود در سطح کاهش پیدا می‌کند.

شکل شماره ۸ 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 انحلال پذیری بالای آهن موجود در بین با نیکل موجود در پوشش می‌باشد. در واقع انحلال شدید این دو عنصر سبب ایجاد جوش موضعی بین بین و سطح پوشش می‌شود که در اثر چرخش‌های مکرر بین روی سطح نمونه کندگی شدیدی را ایجاد می‌کند. از روی تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده پوشش نیکل-بور می‌توان به این نتیجه دست یافت که مکانیزم سایش در این نمونه از نوع سایش چسبان می‌باشد. با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی تا غلظت ۰/۶ gr/lit همانطور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی دیده می‌شود میزان کندگی موجود در سطح کاهش پیدا می‌کند.

surfactant mixtures, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 531 (2017) 141-149.

[15] M.D. Clark, S. Subramanian, R. Krishnamoorti, Understanding surfactant aided aqueous dispersion of multi-walled carbon nanotubes, *Journal of colloid and interface science*, 354 (2011) 144-151.

[16] Y.-C. Chiang, W.-H. Lin, Y.-C. Chang, The influence of treatment duration on multi-walled carbon nanotubes functionalized by H₂SO₄/HNO₃ oxidation, *Applied Surface Science*, 257 (2011) 2401-2410.

[17] Alishahi, M., et al. "Synthesis and passivation behavior of electroless Ni-P-CNT composite coating." *Materials and Corrosion* 64.3 (2013): 212-217.

[18] Alishahi, Mostafa, et al. "The effect of carbon nanotubes on the corrosion and tribological behavior of electroless Ni-P-CNT composite coating." *Applied Surface Science* 258.7 (2012): 2439-2446.

[19] Wang, L_Y, et al. "Friction and wear behavior of electroless Ni-based CNT composite coatings." *Wear* 254.12 (2003): 1289-1293.

[20] Praveen, B. M., and T. V. Venkatesha. "Electrodeposition and properties of Zn-Ni-CNT composite coatings." *Journal of Alloys and Compounds* 482.1-2 (2009): 53-57.

[21] U. Tocoglu, M. Alaf, O. Cevher, M. Guler, H. Akbulut, The effect of oxidants on the formation of multi-walled carbon nanotube buckypaper, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 12 (2012) 9169-9174.

[22] T.A. Saleh, The influence of treatment temperature on the acidity of MWCNT oxidized by HNO₃ or a mixture of HNO₃/H₂SO₄, *Applied surface science*, 257 (2011) 7746-7751.

[23] 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, *Applied Surface Science*, 263 (2012) 640-647.

[24] V. Vitry, L. Bonin, Increase of boron content in electroless nickel-boron coating by modification of plating conditions, *Surface and Coatings Technology*, 311 (2017) 164-171.

[25] E. Georgiza, V. Gouda, P. Vassiliou, Production and properties of composite electroless Ni-B-SiC coatings, *Surface and Coatings Technology*, 325 (2017) 46-51.

[26] Gou, Lei, et al. "Rational synthesis of Ni₃(HCOO)₆/CNT ellipsoids with enhanced lithium storage performance: inspired by the time evolution of the growth process of a nickel formate framework." *Dalton Transactions* 46.19 (2017): 6473-6482.

۵- مراجع

[1] Z.A. Hamid, H. Hassan, A. Attyia, Influence of deposition temperature and heat treatment on the performance of electroless Ni-B films, *Surface and coatings technology*, 205 (2010) 2348-2354.

[2] Q.-I. Rao, G. Bi, Q.-h. Lu, H.-w. Wang, X.-I. Fan, Microstructure evolution of electroless Ni-B film during its depositing process, *Applied Surface Science*, 240 (2005) 28-33.

[3] P. Sahoo, S.K. Das, Tribology of electroless nickel coatings – a review, *Mater. Des.* 32 (2011) 1760-1775.

[4] V. Vitry, L. Bonin, Formation and characterization of multi-layers borohydride and hypophosphite reduced electroless nickel deposits, *Electrochim. Acta* 243 (2017) 7-17.

[5] F. Madah, C. Dehghanian, A.A. Amadeh, Investigations on the wear mechanisms of electroless Ni-B coating during dry sliding and endurance life of the worn surfaces, *Surface and Coatings Technology*, 282 (2015) 6-15.

[6] A. Mukhopadhyay, T.K. Barman, P. Sahoo, Tribological behavior of sodium borohydride reduced electroless nickel alloy coatings at room and elevated temperatures, *Surface and Coatings Technology*, 321 (2017) 464-476.

[7] M. Anik, E. Körpe, E. Şen, Effect of coating bath composition on the properties of electroless nickel-boron films, *Surface and Coatings Technology*, 202 (2008) 1718-1727.

[8] P. Wu, H. Du, X. Chen, Z. Li, H. Bai, E. Jiang, Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings, *Wear*, 257 (2004) 142-147.

[9] L. Chen, L. Wang, Z. Zeng, T. Xu, Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni-Al₂O₃ composite coatings, *Surface and Coatings Technology*, 201 (2006) 599-605.

[10] M. Mu, X. Zhou, Q. Xiao, J. Liang, X. Huo, Preparation and tribological properties of self-lubricating TiO₂/graphite composite coating on Ti6Al4V alloy, *Applied Surface Science*, 258 (2012) 8570-8576.

[11] E. Georgiza, V. Gouda, P. Vassiliou, Production and properties of composite electroless Ni-B-SiC coatings, *Surface and Coatings Technology*, 325 (2017) 46-51.

[12] B. Munkhbayar, M.J. Nine, J. Jeoun, M. Bat-Erdene, H. Chung, H. Jeong, Influence of dry and wet ball milling on dispersion characteristics of the multi-walled carbon nanotubes in aqueous solution with and without surfactant, *Powder technology*, 234 (2013) 132-140.

[13] M. Zhou, Y. Mai, H. Ling, F. Chen, W. Lian, X. Jie, Electrodeposition of CNTs/copper composite coatings with enhanced tribological performance from a low concentration CNTs colloidal solution, *Materials Research Bulletin*, 97 (2018) 537-543.

[14] S. Javadian, A. Motae, M. Sharifi, H. Aghdastinat, F. Taghavi, Dispersion stability of multi-walled carbon nanotubes in cationic