

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Effect of heat treatment on the hardness and wear resistance of Electroless hybrid coatings Ni-P-B₄C-PTFE on aluminum 7023

A.poustdouz¹, S.Akhavan², A.Tahvilian²

1. Islamic Azad University of Khomeini Shahr, Young Researchers Club elite, Khomeini Shahr, Iran
2. Msc, Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract

In this study, The Effect of Heat Treatment on The hardness and wear resistance of hybrid coatings Ni-P-B₄C-PTFE is produced by Electroless method was investigated. On the samples of Aircraft Grade Aluminum, coatings of Ni-P, Ni-P-PTFE, Ni-P-B₄C and Ni-P-B₄C-PTFE were created. Boron carbide particles 4 grams per liter and Suspansun PTFE 10 grams per liter were added to The Electroless baths. The hardness of the samples was calculated. Then for determine the wear resistance and coefficient of friction, the pin on disc was used. In order to investigate the effect of heat treatment, hardness, wear resistance and friction coefficient of the samples before and after thermal treatment were tested in the same loading conditions. The results were compared with four types of coatings. The results showed that heat treatment improves hardness and wear resistance up to 50 percent. Ni-P-PTFE composite coating had The lowest friction coefficient and composite coating Ni-P-B₄C had most hardness and hybrid coating Ni-P-B₄C-PTFE showed the best wear resistance. **Keywords: Electroless- hybrid- B₄C- PTFE- Wear-Hardness**

تاثیر عملیات حرارتی بر سختی و مقاومت به سایش پوشش هیبریدی Ni-P- B₄C-PTFE به روش الکترولس روی آلومینیوم ۷۰۲۳

امین پوست دوز^۱، سعید اخوان^۲، احمد تحویلپان^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبه، خمینی شهر، ایران

۲- کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

در این پژوهش، تاثیر عملیات حرارتی بر سختی و مقاومت به سایش پوشش هیبریدی Ni-P-B₄C-PTFE تولید شده به روش الکترولس مورد بررسی قرار گرفت است. پوشش‌های Ni-P، Ni-P-PTFE، Ni-P-B₄C و Ni-P-B₄C-PTFE بر روی نمونه‌های آلومینیومی گروه هوایی، ایجاد شد. ذرات کاربید بور به ازای ۴ گرم بر لیتر و سوسپانسون PTFE به ازای ۱۰ گرم بر لیتر به حمام الکترولس با درصد فسفر متوسط اضافه شد. در ابتدا سختی نمونه‌ها محاسبه و سپس به منظور تعیین مقاومت به سایش و ضریب اصطکاک از دستگاه پین روی دیسک استفاده شد. به منظور بررسی تأثیر عملیات حرارتی، سختی، مقاومت سایشی و ضریب اصطکاک نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات حرارتی در شرایط بارگذاری یکسان مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت نتایج چهار نوع پوشش با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که عملیات حرارتی باعث بهبود سختی و افزایش ۵۰ درصدی مقاومت به سایش می‌شود. همچنین پوشش کامپوزیتی Ni-P-PTFE کمترین ضریب اصطکاک و پوشش کامپوزیتی Ni-P-B₄C بیشترین سختی و پوشش هیبریدی Ni-P-B₄C-PTFE بهترین مقاومت به سایش را از خود نشان دادند.

مقدمه

استفاده از فناوری سطح جهت ارتقای خواص سطحی و همچنین محافظت از سطح قطعات در کاربردهای مختلف اجتناب‌ناپذیر است. اعمال پوشش روی سطح قطعات از مهم‌ترین روش‌های بهبود خواص سطحی و حفظ سطح قطعات در برابر آسیب‌های مختلف مانند سایش و خوردگی است. به عنوان مثال به کارگیری نمونه‌های آلومینیومی بدون ایجاد پوشش باعث تشدید خوردگی آن قطعه خواهد شد [۱]. در پوشش دهی الکترولس، از منبع جریان خارجی استفاده نشده و رسوب، نتیجه احیای یون فلزی به اتم فلزی در حضور عوامل احیا کننده است. به دلیل مزایایی چون ایجاد لایه یکنواخت، عدم نیاز به تجهیزات الکتریکی جهت آبکاری و عدم محدودیت در حجم سیستم، پوشش دهی الکترولس اهمیت خاص صنعتی پیدا کرده است [۲]. امروزه آبکاری الکترولس Ni-P کاربردهای متنوعی را در صنایع مختلف از جمله صنایع الکتریکی و الکترونیک، نفت، گاز و هوا و فضا به خود اختصاص داده است [۳]. اما جدیدترین پیشرفت در زمینه پوشش الکترولس Ni-P رسوب دهی همزمان ذرات جامد در طول پوشش‌دهی است که بسته به نوع ذره، می‌تواند ذرات سخت و یا ذرات نرم باشد [۴]. ذرات سختی نظیر SiC، Al₂O₃ و B₄C جهت افزایش سختی و مقاومت به سایش پوشش استفاده می‌شود و ذرات نرمی چون PTFE، MoS₂ و گرافیت به عنوان روانکار خشک با قرار گرفتن در پوشش الکترولس Ni-P موجب کاهش ضریب اصطکاک و افزایش روانکاری پوشش می‌گردند [۵-۱۲]. کاربید بور، یک سرامیک خاکستری رنگ متمایل به سیاه است که به عنوان ماده‌ای ساینده بسیار سخت با ریز سختی حدود ۳۰۰۰ kg/mm³ بعد از الماس با سختی ۹۰۰۰ kg/mm³ و BN مکعبی با سختی ۴۴۰۰ kg/mm³ قرار می‌گیرد. سختی در دمای بالای کاربید بور از الماس و BN مکعبی بیشتر است. از دیگر خواص استراتژیک کاربید بور مسئله جذب نوترونی بالای آن بوده که این خصیصه همراه با دیرگدازی بالا سبب کاربرد وسیع آن در ساخت تأسیسات هسته‌ای شده است [۱۳ و ۱۴].

ابراهیمیان و همکاران سختی پوشش Ni-P-B₄C به ازای مقادیر مختلف ذرات کاربید بور با اندازه متوسط ۱۰ میکرون را مورد بررسی قرار دادند. با افزایش ذرات کاربید بور به مقدار ۸ گرم بر لیتر بیشترین سختی (حدود ۱۳۰۰ ویکرز) گزارش شده است [۱۵]. عراقی و همکاران مقاومت به سایش پوشش Ni-P-B₄C روی زیر لایه منیزیم به ازای ۲ گرم بر لیتر با اندازه متوسط ۲ میکرون در مقایسه با منیزیم مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۶ و ۱۷].

معمولاً روانکارهای جامد در محلی مورد استفاده قرار می‌گیرند که روانکار مایع نتواند استفاده شود. این موارد شامل دمای بالا، دمای شدیداً پایین یا خلا بالا می‌باشد [۱۸]. تنها پلیمری که به صورت پوشش بر روی مواد سخت به طور وسیع به عنوان یک روانکار به کار می‌رود PTFE می‌باشد. این ذرات به خاطر خواصی نظیر خاصیت روانکاری مناسب، عدم قابلیت حل شوندگی در اکثر حلال‌ها، پایداری شیمیایی مناسب و ضریب اصطکاک پایین نسبت به بقیه پلیمرها - به خاطر انرژی سطحی کمتر - به عنوان روانکار جامد ترجیح داده می‌شود. این روانکارها بین سطوح در حال لغزش، لایه‌ای را فراهم می‌کنند که استحکام برشی کمتری نسبت به دو سطح دارد و یا ممکن است در برخی موارد سطوح را کاملاً از هم جدا نگه دارند [۱۹-۲۱].

در این پژوهش خواص سختی، مقاومت به سایش و خوردگی پوشش هیبریدی Ni-P-B₄C با اندازه متوسط ۲ میکرون ذرات B₄C و ۲۰۰ نانومتر ذرات PTFE روی آلومینیوم ۷۰۷۳ مورد بررسی قرار گرفته است.

روش تحقیق

در این تحقیق از صفحاتی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۲۳ در ابعاد ۲۰mm در ۲۰ mm جهت پوشش‌دهی استفاده شد. آنالیز شیمیایی نمونه‌های تهیه شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): آنالیز شیمیایی تهیه شده از کوانتومتری نمونه‌های تهیه شده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۲۳

عنصر	درصد
Al	۸۹/۹۷۳
Cu	۱/۴
Mg	۲/۲
Si	۰/۷
Fe	۰/۵۳
Mn	۰/۳
Ni	۰/۰۲
Zn	۴/۷
Pb	۰/۰۵
Sn	۰/۰۰۷
Ti	۰/۰۲
Cr	۰/۱

قبل از هرگونه عملیات آّبکاری روی نمونه فلزی، می‌بایستی عملیات آماده سازی سطح انجام شود به طوری که پوشش به خوبی روی آن بنشیند. برای رسیدن به این هدف، باید یک یا چند عمل آماده‌سازی به منظور پاک کردن آلودگی‌های سطح و فعال‌سازی آن انجام شود. به منظور پاک‌سازی آلودگی‌ها و همچنین صیقلی‌کردن سطح ابتدا نمونه‌ها تحت عملیات سنباده زنی و پولیش قرار گرفتند. سپس مراحل آماده‌سازی سطح نمونه‌ها به شرح زیر اعمال شد با این توضیح که بین هر مرحله قطعات به مدت دو دقیقه با آب مقطر شستشو شدند:

در مرحله اول چربی‌های سطحی با آب و صابون شستشو داده شدند. در مرحله دوم محلولی حاوی ۱۵ گرم بر لیتر کربنات سدیم و ۵ گرم بر لیتر فسفات سدیم تهیه شد. محلول چربی‌گیری تهیه شده را به دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد رسانده و نمونه‌ها به مدت ۴ دقیقه در آن قرار داده شدند. بعد نمونه‌ها به مدت ۲ دقیقه در محلول ۲ درصد حجمی سود غوطه‌ور و به منظور فعال‌سازی سطح، در محلول ۱۵ درصد حجمی اسید نیتریک وارد و به مدت ۱ دقیقه در آن نگاه داشته شدند. بعد از فعال‌سازی سطح، نمونه‌ها به مدت ۱/۵ دقیقه در محلول زینکاته تجاری و پس از آن به جهت ایجاد زینکاته با کیفیت بالاتر بار دیگر در محلول فعال‌سازی (اسید نیتریک ۱۵ درصد) قرار داده شد (این بار به مدت ۳۰ ثانیه) و در پایان نمونه‌ها مجدداً در محلول زینکاته قرار داده شده و بعد از آن بلافاصله وارد محلول الکترولس شدند.

برای پوشش‌دهی نمونه‌ها از یک حمام الکترولس تجاری محصول شرکت آلمانی (AHC-Surface (RIAG با درصد متوسط فسفر استفاده شد. این حمام لکترولس از ترکیب سه جزء مجزا تهیه می‌شود که ترکیب نهایی شامل ۵g/l نیکل و ۲۰g/l هیپوفسفات سدیم و ۱۰g/l نانوذرات PTFE است. لازم بذکر است که نانوذرات PTFE، به صورت سوسپانسیون شامل ۶۰ درصد وزنی نانوذرات با اندازه ذرات حدود ۲۰۰nm می‌باشد.

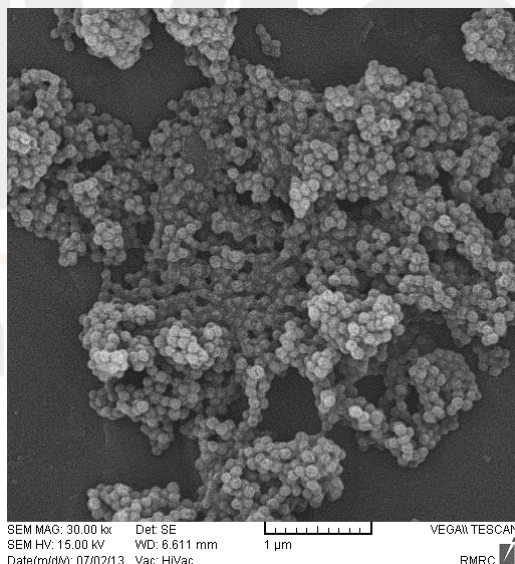
نانوذرات PTFE پس از اضافه شدن به محلول و قبل از پوشش‌دهی به مدت ۵ ساعت با همزن مغناطیسی و دور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به هم‌زده شدند. سپس ذرات B₄C به محلول اضافه شده و قبل از پوشش‌دهی به مدت یک ساعت از همزن مغناطیسی با دور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سپس از همزن التراسونیک ب مدت ۱۰ دقیقه استفاده شد تا از آگلومره شدن ذرات جلوگیری شود. حجم حمام مورد استفاده ۲۵۰ میلی‌لیتر در نظر گرفته شد و پس از اتمام مدت زمان پوشش‌دهی، نمونه‌ها از محلول پوشش‌دهی خارج و با آب مقطر به خوبی شسته شدند. برای تنظیم pH از آمونیاک و اسید سولفوریک رقیق استفاده شد. در حین پوشش‌دهی نیز از همزن مغناطیسی با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. لازم به توضیح است که pH و دمای پوشش‌دهی ارائه شده از طرف شرکت سازنده محلول به ترتیب مقادیر pH=۵ و دمای ۸۵°C در نظر گرفته شده است. ضخامت ایجاد شده روی نمونه‌ها در حدود ۴۰μm می‌باشد. برای تعیین ضخامت پوشش از میکروسکوپ نوری و ضخامت‌سنج مغناطیسی مدل FISCHERScope MULTI 650/750C استفاده شد. در این تحقیق نمونه‌ها بعد از پوشش‌دهی به منظور بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر سختی و مقاومت به سایش تحت دمای ۳۰۰ درجه

سانتیگراد به مدت دو ساعت عملیات حرارتی شدند. به منظور تعیین مقاومت به سایش و ضریب اصطکاک، مطابق استاندارد ASTM G0099-04A، از دستگاه پین روی دیسک استفاده شد. قبل و بعد از عملیات حرارتی، نمونه‌ها در شرایط یکسان با نیروی ۵۰۰ گرم تحت آزمایش سایش قرار گرفتند و نمودارهای مسافت بر حسب کاهش وزن و ضریب اصطکاک ثبت شد. برای سختی‌سنجی از سختی سنج Vickers مدل KOOPA MH3 استفاده (مقدار نیروی اعمالی برای سختی‌سنجی ۲۰۰ گرم و مدت زمان اعمال نیرو ۱۰ ثانیه بود). مورفولوژی پوشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN مدل VEGA II و ترکیب شیمیایی آن توسط آنالیز تفکیک انرژی EDX و طیف‌سنج پراش اشعه ایکس، Philips X'Pert Pro مدل PW 3040/60 مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز کوانتومتری زیرلایه نیز با دستگاه Belec Vario Lab انجام شد.

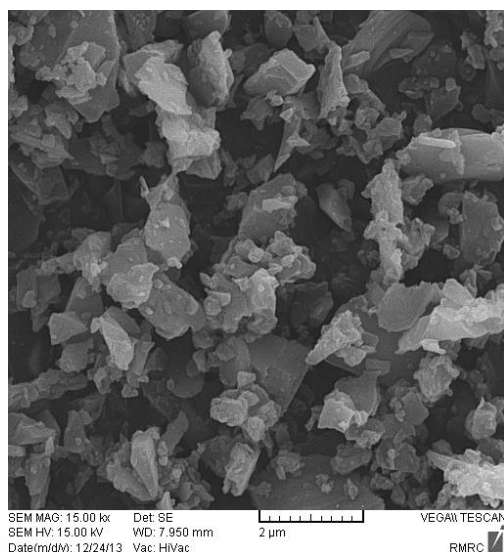
نتایج و بحث

- بررسی مورفولوژی پوشش و ترکیب:

تصویر پودر PTFE و B_4C استفاده شده به ترتیب در شکل (۱) و (۲) نشان داده شده است.

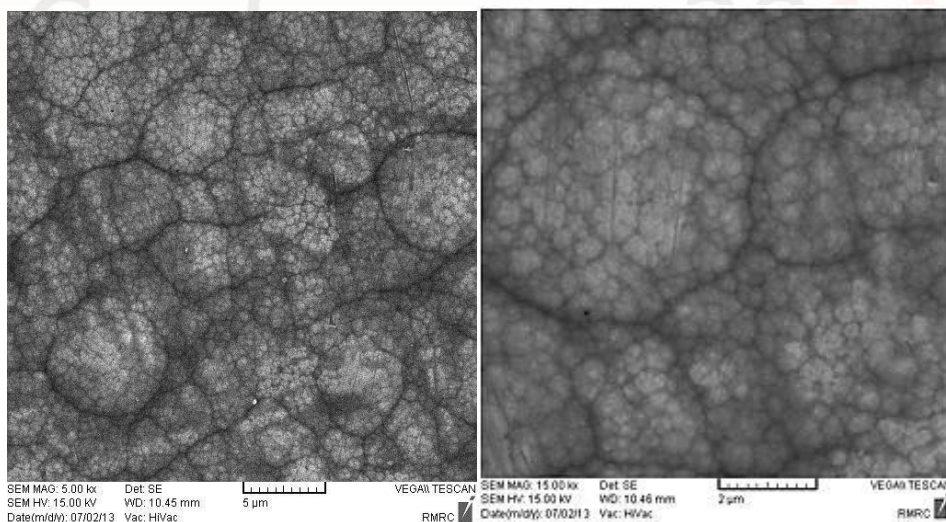


شکل (۱): تصویر پودر PTFE

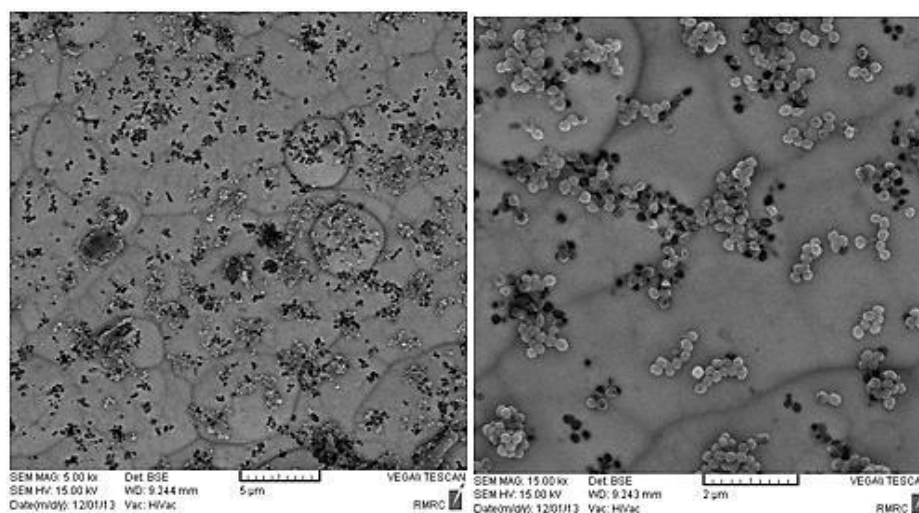


شکل (۲): تصویر پودر کاربید بور

تصاویر سطح پوشش‌های Ni-P و Ni-P-B₄C-PTFE در اشکال (۳) و (۴) مشاهده می‌شود. مشاهده‌ی سطح پوشش هیبریدی و مقایسه‌ی آن با پوشش Ni-P، نشان‌گر اختلاف قابل توجه در نوع مورفولوژی پوشش است. همچنین مشاهده می‌شود ساختار به وجود آمده، به صورت گرده‌ای است لکن وجود ذرات PTFE و B₄C باعث افزایش سرعت رشد دانه‌ها (ندول‌ها) و ریزتر شدن ساختار دانه‌ها شده است. ذرات PTFE اجازه نشست پودر B₄C با اندازه بیشتر از ۰/۵ میکرون را نمی‌دهند. پدیده مشابهی در پوشش هیبریدی Ni-P-TiO₂-PTFE دیده شده است [۲۲].

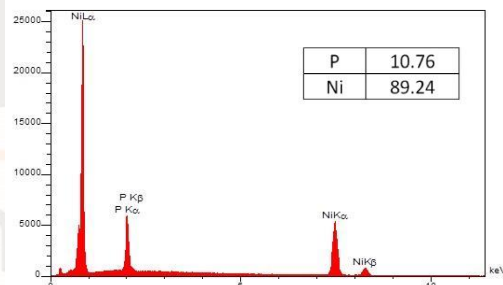


شکل (۳): تصویر سطح پوشش Ni-P

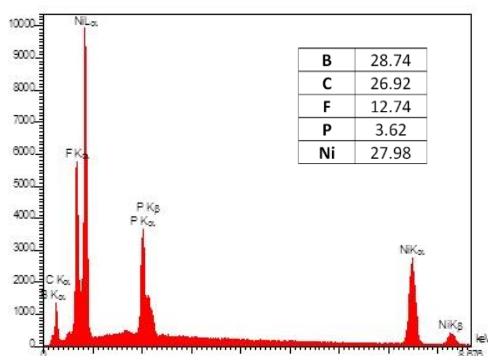


شکل (۴): تصویر سطح پوشش Ni-P-B₄C-PTFE

نمودار آنالیز عنصری پوشش‌های Ni-P و Ni-P-B₄C-PTFE در اشکال (۵) و (۶) نشان دهنده وجود ذرات بور، کربن و فلور در پوشش است. عنصر بور نشان‌دهنده‌ی وجود ذرات B₄C و عنصر فلور نشان‌دهنده ذرات PTFE است.



شکل (۵): آنالیز عنصری پوشش Ni-P



شکل (۶): آنالیز عنصری پوشش Ni-P-B₄C-PTFE

- سختی پوشش‌های Ni-P و Ni-P-B₄C-PTFE

آزمون ریز سختی از روی نقاط مختلف سطح گرفته شد. قابل ذکر است که سختی سنجی پوشش با زمینه نرم مانند آلومینیوم توصیه نمی‌شود مگر با ضخامت بالای ۲۰ میکرون، و علت آن اثرگذاری زمینه نرم در مقدار ریز سختی عنوان شده است. سختی نمونه‌های تهیه شده از مقطع اندازه‌گیری شد که نتیجه آن مشابه نتیجه حاصل از نمونه‌ی بدون برش بود. با افزایش ضخامت، سختی افزایش می‌یابد. این در حالی است که پس از رسیدن به یک ضخامت مشخص (حدود ۲۰ میکرون) میزان افزایش سختی تقریباً به صفر می‌رسد که مفهوم آن رسیدن به سختی واقعی پوشش است. به عبارت دیگر، در ضخامت‌های کمتر از ضخامت مذکور، سختی اعلام شده متأثر از تغییر شکل پلاستیک زیرلایه است. در حالی که با افزایش ضخامت بیش از این مقدار، نقش زیرلایه در تعیین سختی به کلی حذف می‌شود و سختی واقعی پوشش ثبت خواهد شد [۲۳]. گزارش آزمون ریز سختی روی سطح نمونه‌ها، قبل و بعد از عملیات در جدول (۲) آورده شده است.

با ورود ذرات PTFE در پوشش، سختی کاهش و با ورود ذرات سخت B₄C، سختی افزایش می‌یابد. رفتار اخیر به راحتی قابل پیش‌بینی است. چرا که افزایش مقدار ذرات نرم PTFE در پوشش، معادل با کاهش درصد زمینه آلیاژ نیکل فسفر بوده و در نهایت سختی افت می‌کند. مطابق قانون مخلوط‌ها در کامپوزیت، با افزوده شدن سهم یکی از اجزای کامپوزیت خواص نهایی کامپوزیت به همان نسبت تغییر می‌کند، بنابر این قابل انتظار است که با افزایش حضور ماده‌ای با سختی پایین، سختی کامپوزیت افت پیدا کند. در واقع با افزایش PTFE در پوشش، پوشش اسفنجی می‌شود و مقدار فلزی که زیر فرو رونده^۱ دستگاه سختی سنج قرار می‌گیرد کمتر شده و سختی افت می‌کند.

زمانی که بوسیله گوه دستگاه سختی سنج به سطح پوشش نیرویی وارد می‌شود نابیایی‌ها به حرکت در می‌آیند و در مسیر حرکت خود به ذرات PTFE برخورد خواهند کرد، از آنجایی که PTFE فازی بسیار نرم است، مانند ذرات سرامیکی دیگر مانند کاربید بور، نمی‌تواند مانع گذر کردن نابیایی‌ها شود و نابیایی، ذرات را به راحتی از زمینه کنده و یا باعث برش خوردن آن‌ها شده و در هر دو حالت به مسیر حرکت خود ادامه می‌دهد. بنابراین تغییر فرم پلاستیک (در مقیاس میکرونی) در پوشش‌های حاوی ذرات PTFE نسبت به پوشش‌های بدون ذرات با سهولت بیشتری انجام می‌شود و سختی پوشش کمتر می‌باشد. مشاهده می‌گردد که مقدار سختی پوشش هیبریدی الکترولس Ni-P-B₄C-PTFE مابین پوشش کامپوزیتی Ni-P-PTFE و پوشش کامپوزیتی Ni-P-B₄C است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سختی پوشش بعد از عملیات حرارتی افزایش یافته است. علت آن را می‌توان به تشکیل فاز Ni₃P نسبت داد.

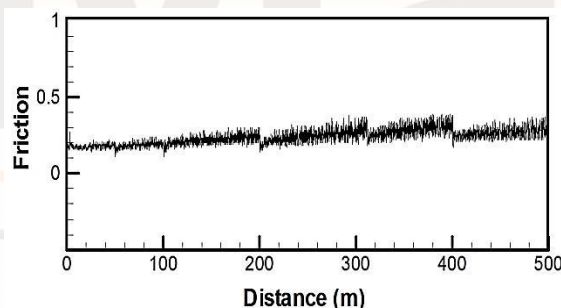
¹ indenter

جدول (۲): مقدار سختی پوشش (ویکرز)

نوع پوشش	قبل از عملیات حرارتی	بعد از عملیات حرارتی
Ni-P	۴۵۴	۱۰۷۶
Ni-P-PTFE	۱۹۰	۳۷۵
Ni-P-B ₄ C	۸۰۴	۱۲۶۰
Ni-P-B ₄ C-PTFE	۴۶۳	۷۲۴

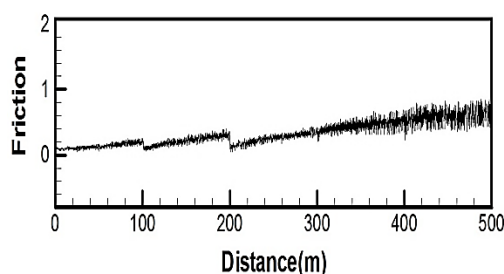
- مقاومت به سایش پوشش‌های Ni-P و Ni-P-B₄C-PTFE

شکل (۷) نمودار ضریب اصطکاک پوشش هیبریدی نسبت به مسافت طی شده تحت بار اعمالی ۵۰۰ گرم را نشان می‌دهد. با اعمال بار ۵۰۰ گرم میانگین ضریب اصطکاک ۰/۴۸ حاصل شد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار ضریب اصطکاک از ۰/۳۶ شروع و به مقدار آن اضافه شده است. به نظر می‌رسد مقدار ذرات PTFE از سطح پوشش به داخل پوشش کاهش یافته و به همین دلیل ضریب اصطکاک افزایش یافته است.

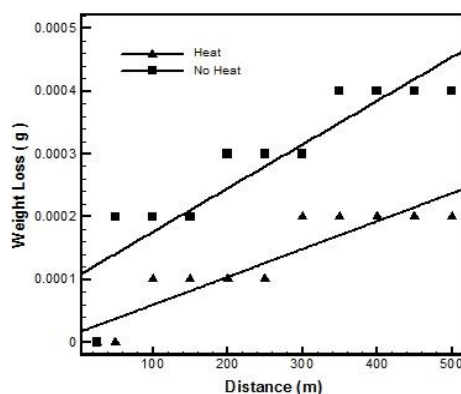


شکل (۷) نمودار ضریب اصطکاک پوشش هیبریدی نسبت به مسافت طی شده، تحت بار ۵۰۰ گرم.

به منظور بررسی تأثیر عملیات حرارتی، نمونه پس از عملیات حرارتی مورد آزمایش مجدد قرار گرفت. شکل (۸) نمودار ضریب اصطکاک پوشش هیبریدی نسبت به مسافت طی شده تحت بار اعمالی ۵۰۰ گرم را بعد از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل (۹) نمودار کاهش وزن پوشش هیبریدی نسبت به مسافت طی شده، قبل و پس از عملیات حرارتی را تحت بار اعمالی ۵۰۰ گرم نشان می‌دهد. نتایج نشان داد میانگین ضریب اصطکاک (قبل و بعد از عملیات حرارتی) از ۰/۴۸ به ۰/۳۲ کاهش یافت و در نتیجه مقاومت به سایش را حدود ۵۰ درصد بهبود بخشید.



شکل (۸): نمودار ضریب اصطکاک پوشش هیبریدی نسبت به مسافت طی شده، بعد از عملیات حرارتی.



شکل (۹) نمودار کاهش وزن پوشش هیبریدی نسبت به مسافت طی شده، قبل و پس از عملیات حرارتی

آزمون سایش برای هر چهار نوع پوشش بعد از عملیات حرارتی انجام شد. برای مقایسه در جدول (۳) مقادیر کاهش جرم و میانگین ضریب اصطکاک هر چهار نوع پوشش آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین ضریب اصطکاک پوشش هیبریدی مابین پوش‌های کامپوزیتی است. همچنین پوشش هیبریدی بهترین مقاومت به سایش را از خود نشان داده است. اضافه کردن ذرات تفلون باعث کاهش ضریب اصطکاک سطح می‌شود و در نتیجه برای کاربرد های لغزندگی با نیروهای کم مفید می‌باشد. چنانچه نیروی وارد بر سطوح لغزنده زیاد باشد استفاده از ذرات نرم تفلون مفید نخواهد بود. بلکه باید از ذرات سخت‌تر مانند کاربید بور، استفاده نمود. مشاهده شد با افزودن ذرات میکرونی کاربید بور سختی پوشش تا مقدار ۱۲۶۰ ویکرز افزایش یافت در نتیجه باعث بهبود مقاومت به سایش پوشش در نیروهای بالا گردید. چنانچه مشاهده شد لغزندگی سطح پوشش کامپوزیتی Ni-P-B₄C نسبت به پوشش نیکل الکترولس و کامپوزیتی نیکل تفلون کمتر است. لکن با استفاده از پوشش هیبریدی Ni-P-B₄C-PTFE می‌توان ضمن ازدیاد سختی زمینه‌ی پوشش نیکل تفلون لغزندگی پوشش کامپوزیتی Ni-P-B₄C به تناسب کاربرد افزایش داد.

جدول (۳): مقادیر کاهش جرم و میانگین ضریب اصطکاک پوشش‌ها تحت بار اعمالی ۵۰۰ گرم

نوع پوشش	میانگین ضریب اصطکاک	کاهش جرم دیسک (گرم)
Ni-P	۰/۴۴	۰/۰۰۱۲
Ni-P-PTFE	۰/۱۸	۰/۰۰۰۵
Ni-P-B ₄ C	۰/۴۸	۰/۰۰۰۵
Ni-P-B ₄ C-PTFE	۰/۳۲	۰/۰۰۰۲

نتیجه‌گیری:

- با ورود ذرات PTFE به زمینه نیکل فسفر سختی و میانگین ضریب اصطکاک کاهش یافت.
- با ورود ذرات B₄C به زمینه نیکل فسفر سختی و میانگین ضریب اصطکاک افزایش یافت.
- عملیات حرارتی باعث بهبود سختی و افزایش ۵۰ درصدی مقاومت به سایش شد.
- سختی و میانگین ضریب اصطکاک پوشش هیبریدی مابین پوش‌های کامپوزیتی است.
- پوشش کامپوزیتی Ni-P-PTFE کمترین ضریب اصطکاک و پوشش کامپوزیتی Ni-P-B₄C بیشترین سختی و پوشش هیبریدی Ni-P-B₄C-PTFE بهترین مقاومت به سایش را از خود نشان دادند.

منابع:

- [۱] س. عظیمی ابرقوئی، ا. ساعتچی و ر. ابراهیمی کهریزسنگی، "استفاده از روشی نوین جهت بررسی خوردگی موضعی آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴، ۷۰۷۵ و ۶۰۶۱ در محیط‌های شبه اتمسفر دریایی"، نشریه مواد نوین، دوره ۴، شماره ۱۳، صفحه ۶۹-۸۲، پاییز ۱۳۹۲.
- [2] R. Tenno, "Electroless Nickel Plating", Finishing Publications LTD, Stevenage, Hertfordshire, England, 1991.
- [3] W. Riedel, "Electroless Nickel Plating", ASM International, Metals Park, Ohio, USA, 1991.
- [4] M. Ratzker, D. S. Lashmore, K. W. Pratt, "Plating Surface Finish", pp. 73-74, 1986.
- [5] S. Alirezaei, S. M. Monirvaghefi, M. Salehi, A. Saatchi, "Wear Behavior of Ni-P and Ni-P-Al₂O₃ Electroless Coatings", Wear, Vol. 262, pp. 978-980, 2007.
- [6] S. M. Moonir-vaghefi, A. Saatchi, "Tribological behaviour of electroless Ni-P-MoS₂", Metallkd, Vol. 88, pp. 498-501, 1997.
- [7] Y. Wu, L. Lei, B. Shen, W. Hu. "Investigation in Electroless Ni-P-C_g (graphite)-SiC Composite Coating", Surface & Coatings Technology, Vol. 201, pp. 441-445, 2006.

- [8] Y. Wu, H. Liu, B. Shen, L. Liu, W. Hu, "The Friction and Wear of Electroless Ni-P Matrix with PTFE and/or SiC particles composite", Tribology International, Vol. 39, pp. 553-559, 2006.
- [9] Y. Wu, B. Shen, L. Liu, W. Hu, "The Tribological Behaviour of Electroless Ni-P-Gr-SiC Composite", Wear, Vol. 261, pp. 201-207, 2006.
- [10] O. A. Leo'n, M. H. Staia, H. E. Hinterman, "Wear Mechanism of Ni-P-BN (h) Composite Autocatalytic Coatings", Surface & Coatings Technology, Vol. 200 pp. 1825 - 1829, 2005.
- [11] Z. Abdel Hamid, S. A. El Badry, A. Abdel Aal, "Electroless Deposition and Characterization of Ni-P-WC Composite Alloys", Surface & Coatings Technology, Vol 201, pp. 5948-5953, 2007.
- [12] S. M. Moonir-vaghefi, A. Saatchi, J. Hejazi, "The Effect of Agitation on Electroless Nickel-Phosphorus-Molybdenum Disulfide Composite Plating", Metal Finishing, Vol 95, pp. 102-106, 1997.
- [۱۳] اف‌ت‌ح‌ی، "بررسی سنتز نانو پودر کاربرد بور با روش شیمیایی"، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ۱۳۸۹.
- [14] S.K. Singhal, B.P.Singh, "Sintering of Boron carbide under high pressures and temperatures", Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 13: 129-134, 2006.
- [15] M.Ebrahimian-Hosseiniabadi, K.Azari-Dorcheh, S.M.M. Vaghefi, "Wear behavior of electroless Ni-P-B4C composite coatings" Wear, 260: 123-127, 2006.
- [16] A. Araghi, M.H. Paydar" Electroless deposition of Ni-P-B4C composite coating on AZ91D magnesium alloy and investigation on its wear and corrosion resistance" Materials and Design 2010.
- [17] A. Araghi, M.H. Paydar" Electroless deposition of Ni-W-P-B4C nanocomposite coating on AZ91Dmagnesium alloy and investigation on its properties" Vacuum 2013.
- [18] S. M. Moonir-Vaghefi, A. Saatchi, "Deposition and Properties of ElectrolessNickel-Phosphorus-Molybdenum Disulfide Composites", Metal Finishing, Vol 95, pp. 46-52, 1997.
- [19] E. Pena-Munoz, P. Bercot, A. Grosjean, M. Rezrazi, J. Pagetti, "Electrolytic and electroless coatings of Ni-PTFE composites Study of some characteristics", Surface and Coatings Technology, , Vol. 107, pp. 85-93, 1998.
- [20] Y. S. Huang, X. T. Zeng, I. Annergren, F. M. Liu, "Development of electroless Ni-P-PTFE-SiC composite coating", Surface and Coatings Technology, Vol. 167, pp. 207-211, 2003.
- [21] M. D. Ger, K. H. Hou, B. J. Hwanh, "Transient phenomena of the codeposition of PTFE with electroless Ni-P coating at the early stage", Material Chemistry & Physics, Vol. 87, pp.102-108, 2004.
- [22] B.Losiewicz, A.Stepien, D.Gierlotka,"Composite layers in Ni-P system containing TiO2 and PTFE, Thin Solid Films", 349: 43-50, 1999.
- [23] S.Matsumura "Composite Electroless Nickel Plating", Conference on Electroless Nickel 91, 4-15, Florida, USA, 1991.