

تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار تریبولوژیکی پوشش الکترولس دولایه کامپوزیتی و نانو کریستالی Ni-P/Ni-B-BN

امین بایوردی^{۱*}، محمد حسین بینا^۲، کامران امینی^۳، سیدابوالقاسم دهقان^۴

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران

۲- دانشجوی دکتری، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، دانشکده مواد پیشرفته و انرژی‌های نو، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، اصفهان، ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران

*amin.baibordi@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۲/۲۳)

چکیده

در این تحقیق به بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر سختی و مقاومت به سایش پوشش الکترولس دولایه کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-BN پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا پوشش الکترولس نیکل-فسفر با ضخامت ۱۵ میکرون و سپس پوشش الکترولس Ni-B-BN با ضخامت ۱۰ میکرون بر روی سطح نمونه‌هایی از جنس فولاد Ck45 اعمال شد. نقش لایه الکترولس نیکل-فسفر ایجاد شده در پوشش دولایه توسط آزمون پلاریزاسیون تافل بررسی شد. نمونه‌های پوشش داده شده تحت عملیات حرارتی به مدت یک ساعت در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. تأثیر عملیات حرارتی بر مرفولوژی، تغییرات ساختاری و رفتار سایشی پوشش‌ها با انجام آزمون‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی، تفرق اشعه ایکس و نیز آزمایش سایش بین بر روی دیسک در دمای محیط مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سختی پوشش‌های حاصل در دو حالت پیش و پس از عملیات حرارتی توسط دستگاه ریزسختی سنج ویکرز اندازه‌گیری و اثر دمای عملیات حرارتی بر سختی پوشش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون پلاریزاسیون تافل نشان داد که حضور لایه الکترولس نیکل-فسفر باعث بهبود مقاومت به خوردگی پوشش دولایه شده است. نتایج حاصل از SEM نشان داد که مورفولوژی پوشش ایجاد شده به صورت گل‌کلمی شکل است. آزمون پراش پرتو ایکس نشان دهنده کریستالیزاسیون پوشش و رسوب فاز سخت بورید نیکل (Ni₃B) در زمینه نیکلی بود. نتایج آزمون سایش بین روی دیسک نشان داد که عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی-گراد سبب کاهش ضریب اصطکاک شده است. هم‌چنین عملیات حرارتی در دمای مذکور باعث ایجاد ساختار نانو کریستالی شده و بنابراین سختی و مقاومت به سایش پوشش به دلیل تغییر ساختار از آمورف به کریستالی و ایجاد فاز سخت Ni₃B افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی:

پوشش الکترولس نیکل-بور، عملیات حرارتی، خوردگی، مقاومت به سایش، ضریب اصطکاک.

۱- مقدمه

از میان روش‌های مختلف ایجاد پوشش‌های فلزی روی فلزات، فرایندهای رسوب فلز از محلول‌های آبی به خاطر سهولت عمل،

به زیرلایه صورت گرفت. پس از عملیات ماسه پاشی بر روی نمونه‌ها پوشش الکترولس دولایه کامپوزیتی نیکل-فسفر/ نیکل-بور-نیتريد بور داده شد. به منظور ایجاد پوشش الکترولس نیکل-فسفر بر روی نمونه‌ها از محلول تجاری الکترولس SLOTONIP 70A ساخت شرکت اسلوترا^۱ آلمان استفاده شد. PH این حمام برابر ۴/۶ و دمای پوشش دهی برابر ۸۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. جهت ایجاد پوشش کامپوزیتی نیکل-بور-نیتريد بور، ابتدا حمامی (جدول (۱)) شامل ۵ گرم بر لیتر از پودر نیتريد بور (BN)^۲ ساخته شده و این حمام به مدت ۲ ساعت داخل حمام التراسونیک قرار گرفت تا این ذرات داخل حمام پخش و یکنواخت شوند. جدول (۲) مشخصات پودر به کار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. این حمام برابر ۱۲/۵ و دمای پوشش دهی برابر ۸۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. پس از یکنواخت شدن ذرات، عملیات پوشش دهی آغاز شد.

جدول (۱): ترکیب شیمیای حمام الکترولس نیکل-بور

| غلظت (گرم بر لیتر) | نام ماده |
|--------------------|--------------------------|
| ۲۰ | کلرید نیکل |
| ۱ | بور هیدرید سدیم |
| ۵۶ | اتیلن دی آمین |
| ۴۰ | هیدروکسید سدیم |
| ۰/۰۱ | نیتريد سرب (Pb^{2+}) |

جدول (۲): مشخصات پودر BN به کار رفته در این تحقیق

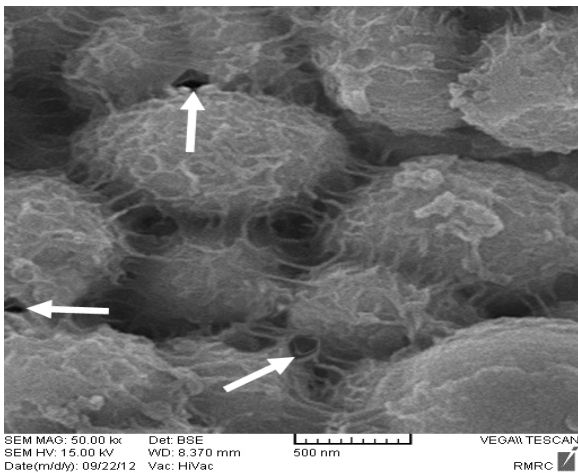
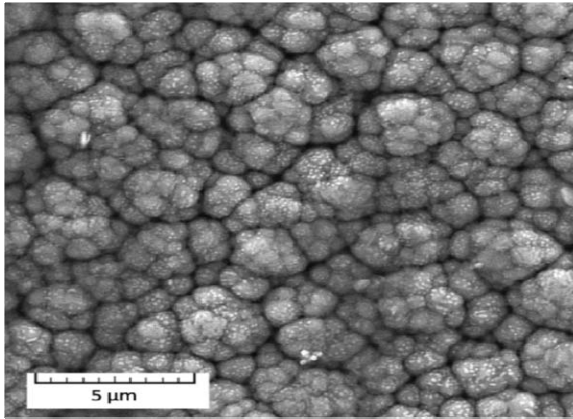
| | |
|-----------|-----------------|
| BN | فرمول شیمیایی |
| هگزاگونال | ساختار کریستالی |
| ۲۹۷۳ °C | نقطه ذوب |

به منظور بررسی نقش لایه الکترولس نیکل-فسفر در پوشش دولایه Ni-P/Ni-B-BN مطالعات خوردگی روی این پوشش انجام گرفت و با پوشش‌های تک لایه Ni-B-BN و Ni-P (با ضخامت مشابه ۲۵ میکرون) مقایسه شد. مطالعات مربوط به مقاومت خوردگی پوشش‌ها توسط آزمون پلاریزاسیون تافل در

قابلیت کنترل و مزایای اقتصادی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. 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 [۱]. امروزه آبکاری الکترولس نیکل-فسفر کاربردهای متنوعی را در صنایع مختلف از جمله صنایع الکتریکی و الکترونیکی، نفت و گاز و هوا و فضا را به خود اختصاص داده است [۲]. به تازگی، حمام آبکاری الکترولس نیکل با عامل کاهنده بور هیدرید بسیار مورد توجه قرار گرفته است. خواص پوشش الکترولس نیکل-بور اغلب مشابه به پوشش‌های الکترولس نیکل-فسفر است. مزیت اصلی پوشش الکترولس نیکل-بور، برتری در سختی و مقاومت به سایش است [۳]. حضور ذرات فاز ثانویه در این پوشش‌ها باعث بهبود برخی از خواص پوشش از جمله سختی و مقاومت به سایش می‌شود [۴-۵] در این بین ذرات BN، به دلیل خاصیت روانکاری مناسب، عدم قابلیت حل شوندگی در اکثر حلال‌ها، پایداری در دماهای نسبتاً بالا و ضریب اصطکاک پایین به عنوان روانکار در مصارف تریبولژیکی به پوشش اضافه می‌گردد [۴-۷]. انجام عملیات حرارتی در پوشش‌های الکترولس نیکل موجب نانو کریستاله شدن پوشش و بوجود آمدن فازهای سخت در آن گشته و باعث افزایش سختی و مقاومت به سایش این پوشش‌ها می‌گردد [۵]. هدف از این تحقیق ایجاد پوشش دولایه کامپوزیتی الکترولس Ni-P/Ni-B-BN و بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر روی رفتار تریبولژیکی پوشش ایجاد شده می‌باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

نمونه‌های دیسکی شکل با ضخامت ۵ mm و قطر ۵۰ mm از جنس فولاد Ck45 تهیه و توسط ذرات سیلیس با اندازه متوسط ۱۰۰ میکرون ماسه پاشی شدند. عملیات ماسه پاشی نمونه‌ها قبل از اجرای مرحله پوشش دهی، به منظور افزایش چسبندگی پوشش



شکل (۱): الف) تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پوشش Ni-P/Ni-B-BN و ب) بزرگنمایی بالاتر

۳-۲- بررسی سطح مقطع پوشش

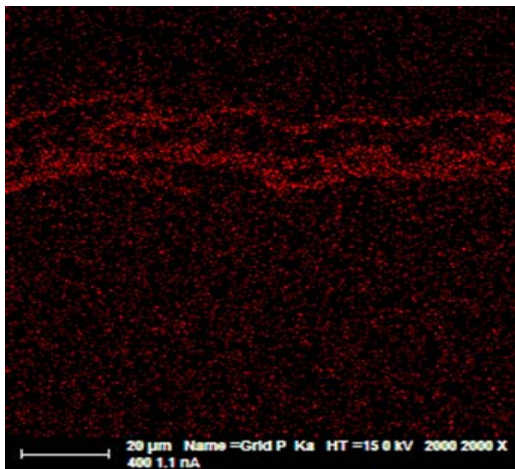
شکل (۲) سطح مقطع پوشش دو لایه کامپوزیتی را به همراه نقشه آنالیز عنصری مربوط به آنها را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در شکل (۲-الف) مشخص است پوشش Ni-P/Ni-B-BN که روی زیر لایه رسوب کرده است بسیار یکنواخت بوده و اتصال خوبی به زیر لایه نشان می‌دهد. ضخامت لایه Ni-P در پوشش دو لایه تقریباً $15\mu\text{m}$ و لایه Ni-B تقریباً $10\mu\text{m}$ است. آنالیز توزیع عناصر در شکل‌های (۲-ب) تا (۲-و) نشان دهنده دو لایه بودن پوشش و حضور ذرات BN در پوشش کامپوزیتی است.

محلول $3/5\text{NaCl}$ توسط دستگاه PARSTAT 2273 انجام گرفت. نمونه‌ها با سطح 1cm^2 در تماس با الکترولیت قرار گرفتند. الکتروود پلاتین به عنوان الکتروود شاهد و الکتروود کالومل اشباع (SCE) به عنوان الکتروود مرجع به کار گرفته شد. با استفاده از روش برون‌یابی تافل پتانسیل و دانسیته جریان خوردگی از منحنی‌های تافل استخراج شد. به منظور بررسی تأثیر عملیات حرارتی روی پوشش دو لایه کامپوزیتی، برخی نمونه‌های پوشش داده شده، تحت عملیات حرارتی در دماهای 300 ، 400 و 500 درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در اتمسفر خنثی قرار گرفتند. در نهایت جهت بررسی مورفولوژی سطوح نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با امکانات EDS و برای تحلیل فازی در سطح نمونه‌ها نیز از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. سختی نمونه‌ها نیز در مقیاس میکرو به روش ویکرز با وزن اولیه 100 گرم اندازه‌گیری شد. به منظور افزایش دقت و اعتبار نتایج آزمایش میکروسختی، این آزمون ۵ مرتبه بر روی نمونه‌های مشابه تکرار و میانگین نتایج مورد استفاده واقع شد. برای ارزیابی و مقایسه رفتار تریبولوژی نمونه‌ها، از ماشین سایش پین بر روی دیسک استفاده گردید. در همه آزمایش‌های سایش از پین فولادی 52100 با سختی حدود 65RC و قطر 6mm به عنوان ماده ساینده کمک گرفته شد. آزمایش سایش در اتمسفر هوا تحت سرعت لغزش $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ تحت نیروی 5 نیوتن و مسافت لغزش حداکثر 1000 متر انجام گرفت.

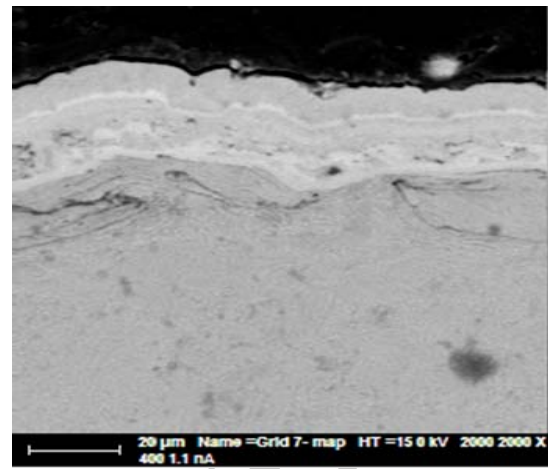
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی مورفولوژی پوشش

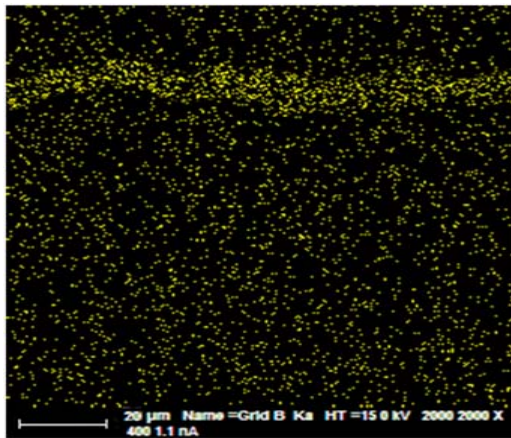
مورفولوژی پوشش الکتروولس Ni-P/Ni-B-BN ایجاد شده بر روی زیر لایه فولادی در شکل (۱) آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مورفولوژی پوشش به صورت گل کلمی است که برای پوشش‌های الکتروولس نیکل-بور کاملاً متداول است [۶]. شکل (۱-ب) پوشش Ni-B همراه با ذرات BN را نشان می‌دهد. ذرات BN توانسته‌اند به خوبی در زمینه Ni-B جای بگیرند و زمینه همچنان از پیوستگی مناسبی برخوردار است.



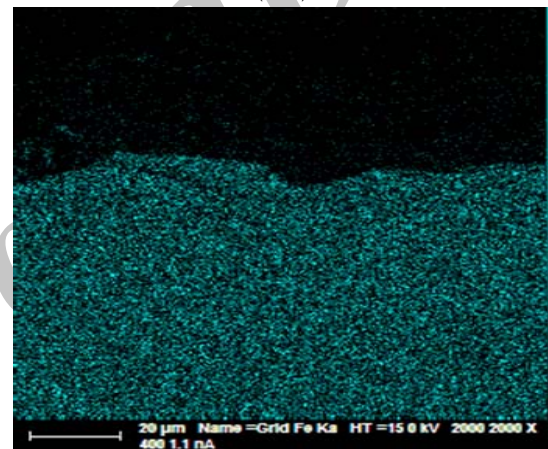
(د)



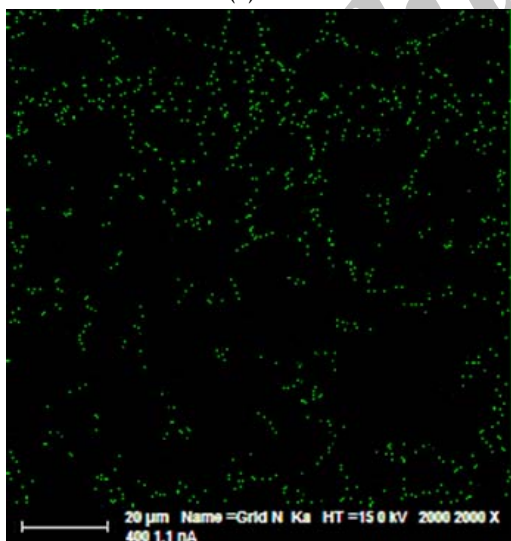
(الف)



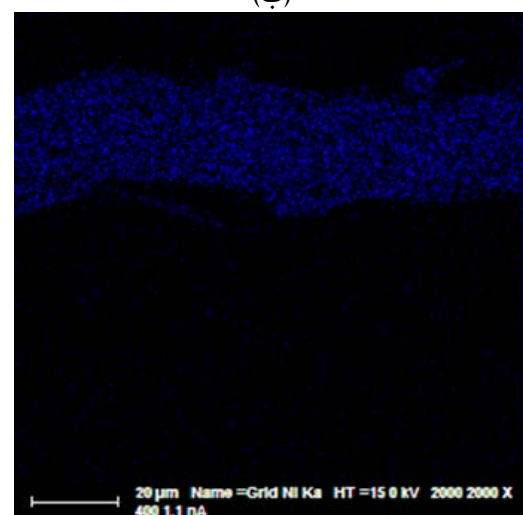
(ه)



(ب)



(و)



(ج)

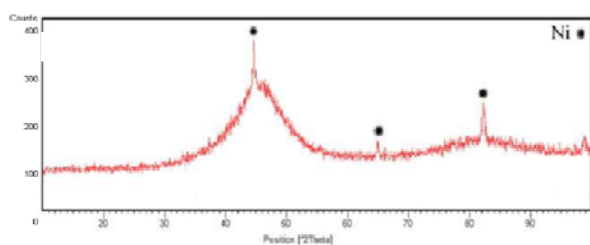
شکل (۲): تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز عنصری: (الف) سطح مقطع پوشش الکترولس دو لایه Ni-P/Ni-B-BN، (ب) حضور عنصر آهن، (ج) نیکل، (د) فسفر، (ه) بور و (و) نیتروژن

جدول (۳): پتانسیل و دانسیته جریان خوردگی حاصل شده از منحنی‌های پلاریزاسیون تافل

| i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | E_{corr} (mV) | پوشش |
|--|-----------------|--------------|
| ۱.۶ | -۳۰۰ | Ni-P |
| ۴.۵ | -۴۳۰ | Ni-P/Ni-B-BN |
| ۵۰ | -۵۷۰ | Ni-B-BN |

۴-۳- تأثیر عملیات حرارتی بر ساختار پوشش

شکل (۴) الگوی پراش پرتو ایکس پوشش الکتروکترولس قبل از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که پوشش‌های ایجاد شده دارای مخلوطی از ریز ساختار آمورف و کریستالی است [۶].



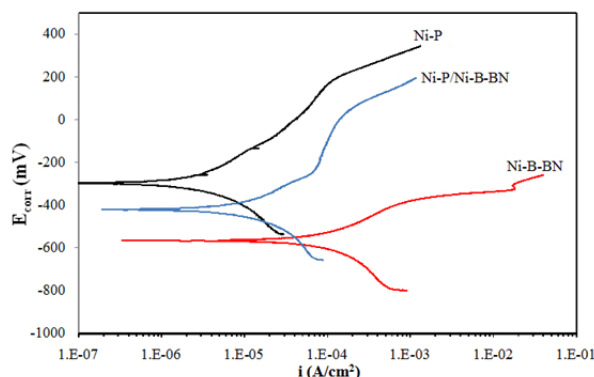
شکل (۴): الگوی پراش پرتو ایکس از پوشش دولایه کامپوزیتی قبل از عملیات حرارتی

شکل (۵)، الگوی XRD سطح پوشش عملیات حرارتی شده را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر تغییر کامل ساختار نسبت به حالت خام می‌باشد، بدین معنی که به جای اثرات آمورف، پیک‌های واضحی از دو فاز نیکل کریستالی با شبکه FCC و بورید نیکل Ni_3B با شبکه کریستالی اورترومبیک در نمودارهای پراش مشاهده گردید (جدول (۴)).

تحقیقات نشان می‌دهد که حداقل دمای لازم برای وقوع استحاله آمورف به کریستالی در پوشش نیکل-بور حدود $300-350^\circ\text{C}$ بوده و افزایش دمای عملیات حرارتی منجر به کریستاله شدن بیشتر پوشش می‌گردد [۵-۸].

۳-۳- نقش لایه الکتروکترولس نیکل - فسفر در پوشش دولایه

شکل (۳) منحنی‌های پلاریزاسیون تافل پوشش دولایه Ni-P/Ni-B-BN و پوشش‌های تک لایه Ni-B-BN و Ni-P را نشان می‌دهد. با استفاده از روش برون‌یابی تافل، پتانسیل و نرخ خوردگی برای هر پوشش محاسبه و در جدول (۳) ارائه شده است. جدول (۳) نشان می‌دهد که پوشش الکتروکترولس Ni-P، مثبت‌ترین پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و پایین‌ترین دانسیته جریان خوردگی (i_{corr}) را در بین منحنی‌های مورد مطالعه دارد. همچنین پوشش دولایه Ni-P/Ni-B-BN پتانسیل خوردگی مثبت‌تر و کاهش شدید دانسیته جریان خوردگی در مقایسه با پوشش تک لایه Ni-B-BN از خود نشان می‌دهد. تفاوت بین پتانسیل خوردگی پوشش Ni-P (لایه بیرونی) و Ni-B-BN (لایه درونی) در حدود ۲۷۰ میلی‌ولت است. بنابراین لایه الکتروکترولس نیکل-فسفر در پوشش‌های دوپلکس می‌تواند به عنوان لایه محافظ به خوردگی عمل کند. زمانیکه در لایه خارجی پوشش دولایه (لایه Ni-B-BN) خوردگی رخ می‌دهد، برخی از حفرات ایجاد شده به سمت نیروی جاذبه (به صورت عمودی) گسترش می‌یابند و به لایه درونی Ni-P می‌رسند. به علت اینکه لایه خارجی Ni-B-BN پتانسیل خوردگی منفی‌تر و دانسیته جریان خوردگی بالاتری نسبت به لایه Ni-P دارد، راحت‌تر خورده می‌شود و به عنوان یک آند فدا شونده برای لایه Ni-P عمل می‌کند. این امر باعث افزایش طول عمر لایه Ni-P و به تبع آن زیرلایه فولادی می‌گردد. در کل، لایه نیکل-فسفر، باعث افزایش مقاومت به خوردگی پوشش‌های دولایه می‌گردد.



شکل (۳): منحنی‌های پلاریزاسیون تافل پوشش‌های ایجاد شده

اندازه دانه کریستال‌ها با استفاده از روش شرر [۱۰] و به کمک نرم افزار X'Pert High Score Version 1.0d اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث نانو کریستاله شدن پوشش شده است و پوشش حاصله پس از عملیات حرارتی دارای اندازه متوسط دانه ۲۶ نانومتر است.

۳-۵- تأثیر دمای عملیات حرارتی بر سختی پوشش

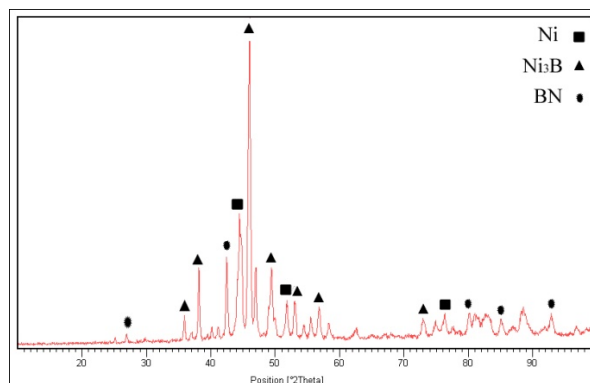
دمای عملیات حرارتی تأثیر بسیار زیادی بر سختی پوشش‌ها دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سختی پوشش در دمای ۳۰۰ °C به دلیل شروع کریستالیزاسیون و حضور هم‌زمان ساختار آمورف و کریستالی و در دمای ۵۰۰ °C به دلیل افزایش دما و رشد بیش از حد دانه‌های Ni₃B و تشکیل فازهای ناخواسته (Ni₄B₃) نسبت به سختی در دمای ۴۰۰ °C کاهش می‌یابد [۵-۶].

پس از اینکه پوشش دولایه کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-BN در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت عملیات حرارتی شد، سختی آن افزایش یافت.

مطالعات نشان می‌دهد که این افزایش سختی مربوط به رسوب بیشتر فاز پایدار بین‌فلزی Ni₃B در طی کریستالیزاسیون فاز آمورف می‌باشد [۵]. گزارش شده است که فاز Ni₃B استحکام و مدول برشی بالایی دارد که باعث اثر گذاری روی سختی این پوشش‌ها می‌شود [۵]. این مشاهدات با نتایج آنالیز XRD تطابق خوبی دارد.

سختی پوشش دولایه کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-BN قبل از عملیات حرارتی ۷۰۲ و یکروز و بعد از عملیات حرارتی ۱۴۴۹ و یکروز بدست آمد.

در جدول (۵) تأثیر دمای عملیات حرارتی روی سختی پوشش دولایه کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-BN بررسی شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود بالاترین سختی مربوط به دمای ۴۰۰ °C می‌باشد و این نتایج به خوبی با نتایج حاصل از آزمون XRD تطابق دارد.

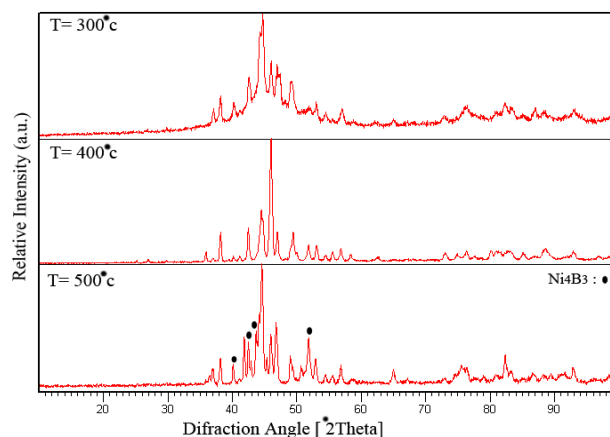


شکل (۵): الگوی پراش پرتو ایکس از پوشش Ni-P/Ni-B-BN بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ °C به مدت ۱ ساعت

جدول (۴): خصوصیات مربوط به پیک‌ها

| Ni | Ni ₃ B | BN | نوع فاز |
|-------|-------------------|-----------|--------------|
| مکعبی | اورتورمبیک | هگزاگونال | نوع شبکه |
| (۱۱۱) | (۰۳۱) | (۱۰۰) | پارامتر شبکه |
| ۴۴/۴۹ | ۴۶ | ۲۱/۷۵ | 2θ (درجه) |

شکل (۶) تأثیر دمای عملیات حرارتی بر میزان کریستاله شدن پوشش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش دما، منجر به افزایش شدت پیک‌های Ni و Ni₃B می‌شود. بهترین دمای کریستاله شدن دمای ۴۰۰ °C می‌باشد و افزایش دما (دمای ۵۰۰ °C)، باعث رشد دانه‌ها و حضور فازهای ناخواسته (Ni₄B₃) در پوشش می‌شود.



شکل (۶): تأثیر دمای عملیات حرارتی بر الگوی تفرق اشعه ایکس پوشش Ni-P/Ni-B-BN

شکل (۸) تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی رویشی از سطوح سایش یافته پوشش Ni-P/Ni-B-BN قبل و بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد.

همان‌طوری که در شکل (۸-الف) مشاهده می‌شود سطح سایش یافته نمونه قبل از عملیات حرارتی به دلیل سختی پایین پوشش و عدم تشکیل فاز کریستالی موجب تشدید تغییر شکل پلاستیک در پوشش می‌گردد که نتیجه این تغییر شکل پلاستیک و ایجاد اتصالات موضعی در نواحی تماس و از هم گسیختگی این اتصالات در ادامه لغزش است.

بنابراین، مکانیزم غالب در سایش این نمونه، مکانیزم سایش چسبان می‌باشد [۹].

شکل (۸-ب) نشان می‌دهد که عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت باعث تبدیل ساختار آمورف به نیکل کریستالی و فسفید بور شده و سطح دچار سایش شده، کاهش یافته است.

تصویر SEM این نمونه، نشان داد که، پوشش دولایه کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-BN حتی پس از مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر، بر روی سطح این نمونه باقی مانده است.

۳-۷- تأثیر عملیات حرارتی بر ضریب اصطکاک پوشش

شکل (۹-الف) نشان می‌دهد که پوشش دولایه کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-BN به خاطر نوع ساختار کریستالی BN که به صورت لایه لایه بوده و شبیه گرافیت عمل می‌کند، ضریب اصطکاک کمی دارد [۱۱]. ولی با افزایش مسافت سایش، ذرات BN از سطح جدا شده و این امر موجب افزایش ضریب اصطکاک می‌شود.

شکل (۹-ب) نشان می‌دهد که عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد علاوه بر کاهش سطح سایش منجر به بهبود ضریب اصطکاک نیز می‌شود.

جدول (۵): تأثیر دمای عملیات حرارتی بر سختی پوشش دولایه

| کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-BN | |
|------------------------|------------------------|
| میانگین سختی (ویکرز) | دمای عملیات حرارتی (C) |
| ۷۰۲ | بدون عملیات حرارتی |
| ۹۴۱ | ۳۰۰°C |
| ۱۴۴۹ | ۴۰۰°C |
| ۱۰۲۲ | ۵۰۰°C |

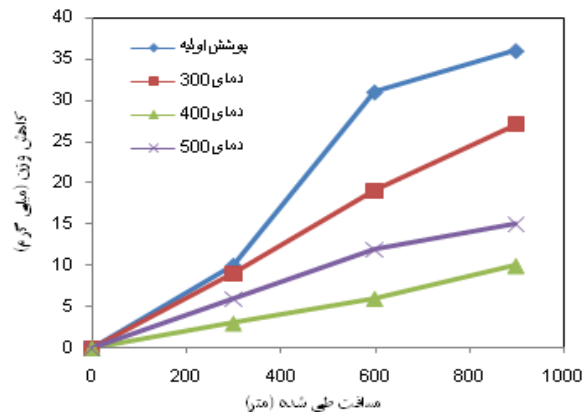
افزایش سختی در پوشش Ni-P/Ni-B-BN به دلیل حضور BN به عنوان فاز ثانویه در زمینه پوشش است که با ایجاد پوشش کامپوزیتی، سختی پوشش نیز افزایش یافته است.

۳-۶- تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار سایشی پوشش

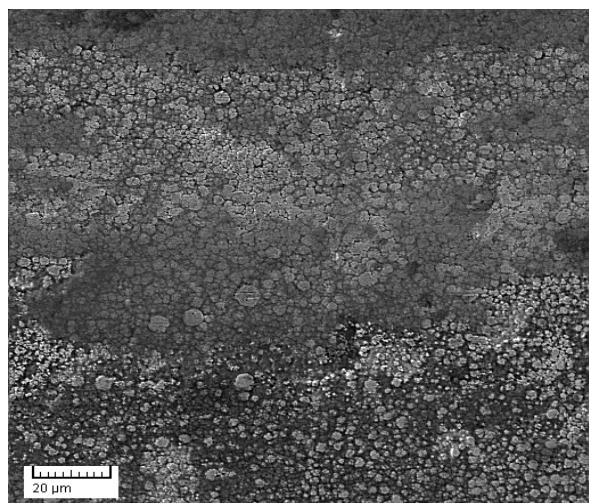
با توجه به نتایج آزمون بارپذیری، آزمون‌های سایش تحت نیروی ۵ نیوتن انجام گردید. منحنی‌های کاهش وزن نمونه‌ها بر حسب مسافت لغزش در شرایط دمای محیط در شکل (۷) نشان داده شده است.

همان‌طوریکه مشاهده می‌شود نمونه‌هایی که در دمای ۴۰۰°C عملیات حرارتی شده‌اند کمترین کاهش وزن و بیشترین کاهش وزن مربوط به نمونه‌های بدون عملیات حرارتی است.

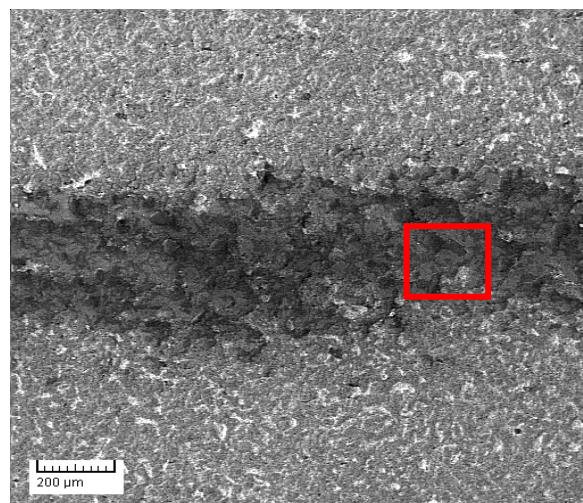
این نتیجه‌گیری مربوط به رسوب فاز پایدار بین فلزی Ni₃B طی کریستالیزاسیون فاز آمورف می‌باشد که با توجه به نتایج آزمون ریزسختی و XRD نیز قابل اثبات است [۹].



شکل (۷): نمودارهای کاهش وزن بر حسب مسافت طی شده پوشش Ni-P/Ni-B-BN

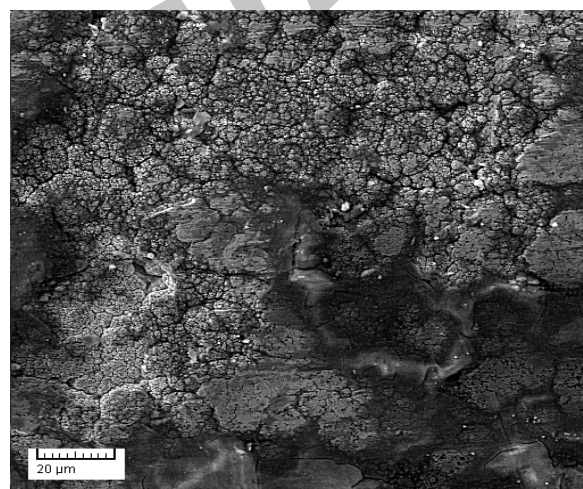


(د)

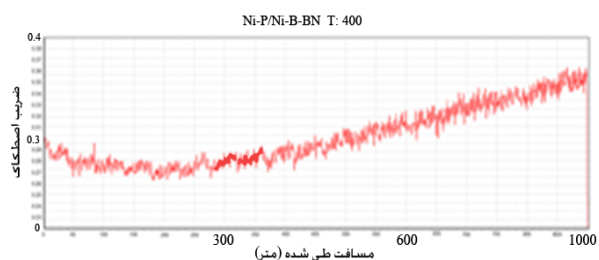


(الف)

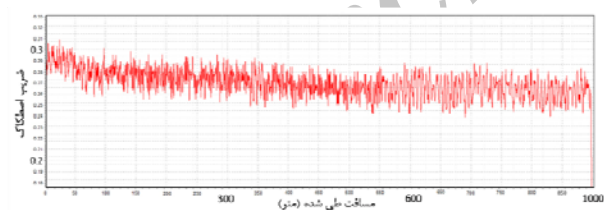
شکل (۸): تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبش یاز سطوح سایش یافته پوشش Ni-P/Ni-B-BN، الف و ب) قبل از عملیات حرارتی، ج و د) بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰°C



(ب)

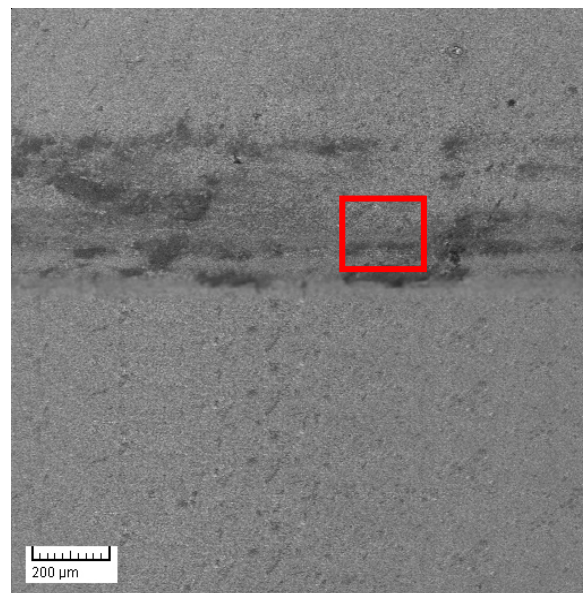


(الف)



(ب)

شکل (۹): مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده در دمای محیط برای نمونه‌های Ni-P/Ni-B-BN الف) پوشش اولیه، ب) عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰°C



(ج)

۴- نتیجه گیری

- ۱- پوشش الکتروولس دولایه Ni-P/Ni-B-BN به صورت نیمه آمورف با ساختاری گل کلمی شکل است.
- ۲- پوشش الکتروولس نیکل- فسفر، مقاومت به خوردگی پوشش

- [5] C.K. Chen, H.M. Feng, H.C. Lin, M.H. Hon, "The Effect of Heat Treatment on The Microstructure of Electroless Ni-B Coatings", *Thin Solid Films*, Vol. 416, pp. 31-37, 2002.
- [6] Z. Abdel Hamid, H.B. Hassan, " Influence of Deposition Temperature and Heat Treatment on the Performance Ofelectroless Ni-B Films", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 2348-2354, 2010.
- [7] O.A. Leo'n, M.H. Staia, H.E. Hintermann, "High Temperature Wear of an Electroless Ni-P-BN (h) Composite Coating", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 163, pp. 578-584, 2003.
- [8] ASM Internatonal Handbook: Alloy Phase Diagrams, 9ed, ASM International, Vol. 3, pp.1216&432, 1994.
- [9] T. Biestek, "Electroless Nickel Coatings: Testing of Corrosion and Wear Resistance", *Galvanotechnic*, Vol. 88, No. 5, pp.1488-1494, 1997.

[۱۰] ا. منشی و س. سلطان عطار، به کار گیری روشی نوین در اندازه گیری نانو ذرات با استفاده از رابطه شرر و پراش پرتو ایکس، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، شماره ۱۰، ص. ۴۳-۵۹، پانیز ۱۳۸۷.

- [11] D. Baudrand, "ASM Metals Handbook, Surface Engineering", Vol. 5, pp.1006, 1994.

1- Schloetter
2- Boron Nitride

۷- پی نوشت

دولایه Ni-P/Ni-B-BN را افزایش داد.

۳- عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، بالاترین میزان سختی (۱۴۴۹ ویکرز)، را در پوشش الکترولس دولایه کامپوزیتی ایجاد کرد.

۴- عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد سبب کاهش ضریب اصطکاک پوشش الکترولس دولایه Ni-P/Ni-B-BN شد.

۵- عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ °C باعث ایجاد ساختار نانوکریستالی شده و بنابراین سختی و مقاومت به سایش پوشش به دلیل تغییر ساختار از آمورف به کریستالی و ایجاد فاز سخت Ni₃B افزایش می یابد.

۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی و دانشگاه شیراز تشکر و قدردانی می گردد.

۶- مراجع

- [1] R.Tenno, "Electroless Nickel Plating", Finishing Publications LTD, Stevenage, Hertfordshire, England, 1991.
- [2] W. Riedel, "Electroless Nickel Plating", ASM International, Metals Park, Ohio, USA, 1991.
- [3] R. N. Duncan, T. Arney, "Operation and Use of Sodium-borohydride-Reducedelectroless Nickel, Plating and Surface Finishing", Vol. 71, 1984.
- [4] Y. Wu, B. Shen, L. Liu, W. Hu, "The Tribological Behaviour of Electroless Ni-P-Gr-SiC Composite", *Wear*, Vol. 261, 2006.