

تأثیر عملیات حرارتی و توزیع نانو ذرات کاربید بور بر مقاومت به خوردگی و سایش پوشش الکترولس دولایه Ni-P/Ni-B-B₄C

محسن رضاقلی زاده*^۱، اعظم حیدری^۱، محمد حسین مینا^۲، احمد ساعتچی^۳

۱- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

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

۳- استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مواد، اصفهان، ایران

*Mrd3087@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۰۱، تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۰)

چکیده

در این تحقیق به بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر روی مقاومت به سایش پوشش الکترولس دولایه کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-B₄C پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا پوشش الکترولس نیکل-فسفر با ضخامت ۱۵ میکرون و سپس پوشش الکترولس Ni-B-B₄C با ضخامت مشابه روی سطح نمونه‌هایی از جنس فولاد Ck45 اعمال شد. جهت ارزیابی خواص پوشش دولایه Ni-P/Ni-B-B₄C، پوشش‌های دولایه نیکل-فسفر/نیکل-بور با ضخامت یکسان و تک لایه نیکل-بور با ضخامت ۳۰ میکرون ایجاد و با این پوشش مقایسه شدند. نقش لایه الکترولس نیکل-فسفر ایجاد شده در پوشش دولایه توسط آزمون پلاریزاسیون نافل بررسی شد. نمونه‌های پوشش داده شده تحت عملیات حرارتی به مدت یک ساعت در دمای ۴۰۰ 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 آزمون سایش بین بر روی دیسک در دمای محیط مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد که حضور لایه الکترولس نیکل-فسفر و توزیع ذرات B₄C در لایه Ni-B باعث بهبود مقاومت به خوردگی پوشش دولایه Ni-P/Ni-B-B₄C شده است. همچنین توزیع ذرات B₄C در لایه Ni-B و عملیات حرارتی که باعث تغییر ساختار پوشش از نیمه آمورف به نانو کریستالی و ایجاد فاز سخت Ni₃B شده است، مقاومت به سایش پوشش را افزایش داد. ایجاد پوشش الکترولس دولایه Ni-P/Ni-B-B₄C روی فولاد ساده کربنی Ck45 با توجه به بهبود همزمان مقاومت به سایش و خوردگی می‌تواند کاربردهای این فولاد را گسترش دهد.

واژه‌های کلیدی:

پوشش الکترولس، کاربید بور، عملیات حرارتی، خوردگی، مقاومت به سایش.

۱- مقدمه

اقتصادی فراوانی می‌گردند[۱]. استفاده از پوشش‌های مناسب تا حد زیادی می‌تواند این مشکل را برطرف سازد[۲]. در این میان

عوامل متعددی از جمله خوردگی و سایش سطوح، سبب تخریب و نابودی قطعات و در عین حال به بار آوردن زیان‌های

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 به زیرلایه صورت گرفت. پس از عملیات ماسه پاشی بر روی نمونه‌ها پوشش الکترولس دولایه کامپوزیتی نیکل-فسفر/ نیکل-بور- کاربید بور داده شد.

به منظور ایجاد پوشش الکترولس نیکل-فسفر بر روی نمونه‌ها از محلول تجاری الکترولس SLOTONIP 70A ساخت شرکت اشلوتر^۲ 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-کاربید بور، ابتدا حمامی (جدول ۱) شامل ۱/۵ گرم بر لیتر از پودر کاربید بور ساخته شده و این حمام به مدت ۲ ساعت داخل حمام التراسونیک قرار گرفت تا ذرات کاربید بور داخل حمام پخش و یکنواخت شوند. pH این حمام برابر ۱۲/۵ و دمای پوشش دهی برابر ۸۵ درجه سانتی-گراد در نظر گرفته شد. پس از یکنواخت شدن ذرات، عملیات پوشش دهی آغاز شد.

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

نام ماده	غلظت (گرم بر لیتر)
کلرید نیکل	۲۰
بور هیدرید سدیم	۱
ایتیلن دی آمین	۶۴
هیدروکسید سدیم	۴۰
نیتريد سرب (Pb^{2+})	۰/۰۱

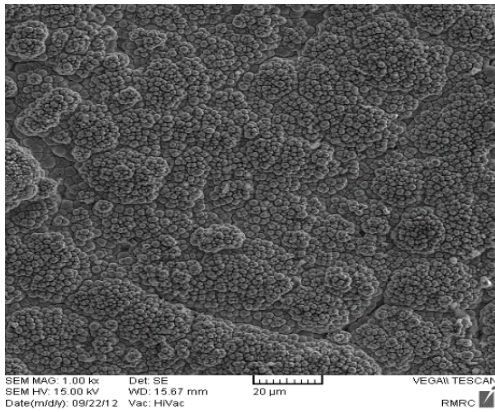
جهت اضافه کردن ذرات کاربید بور به حمام الکترولس، ابتدا این ذرات درون حمام آلتراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه با استون شستشو داده شدند. سپس به مدت ۳۰ دقیقه درون اسید هیدروفلوریدریک فعال سازی شدند. در نهایت به مدت ۲۰ دقیقه درون محلول ۳۰ درصد حجمی کلرید قلع فعال سازی و به حمام الکترولس نیکل- بور اضافه شدند. لازم به ذکر است که در بین هر مرحله، ذرات کاربید بور با آب مقطر شستشو داده شدند. به منظور بررسی نقش لایه الکترولس نیکل-فسفر در پوشش

پوشش الکترولس نیکل به دلیل هزینه تولید پایین به شدت مورد توجه قرار گرفته است [۳]. در روش پوشش دهی الکترولس، رسوب فلز به وسیله احیاء یون‌های فلزی موجود در حمام توسط عامل احیاء کننده و بدون اعمال جریان خارجی انجام می‌شود [۲]. پوشش های الکترولس نیکل- فسفر به دلیل داشتن خواص منحصر به فردی نظیر چسبندگی بسیار خوب به زیرلایه، یکنواختی ضخامت، سختی و مقاومت به سایش بالا جایگاه مهم و وسیعی را در کاربردهای صنعتی به خود اختصاص داده‌اند [۲-۴]. امروزه آبکاری الکترولس نیکل- بور به دلیل ایجاد سختی و مقاوم به سایش بالاتر از پوشش نیکل- فسفر محبوبیت زیادی را به دست آورده است [۲] ولی مقاومت به خوردگی پوشش الکترولس نیکل- بور بسیار کم است. پوشش‌های کامپوزیتی با توجه به دارا بودن مجموعه‌ای از خواص ویژه مانند مقاومت به سایش و سختی بالا، به سرعت جای خود را در صنعت باز کرده و کاربردهای بسیار یافته‌اند [۵-۶]. اضافه کردن ذرات به پوشش الکترولس با هدف افزایش خواص شیمیایی و مکانیکی این پوشش‌ها انجام می‌گیرد [۷و۵]. در این بین ذرات B_4C به دلیل سختی بالا (در حدود ۹/۳ موس)، مقاومت شیمیایی عالی، نقطه ذوب بالا و دانسیته پایین، خاصیت روانکاری مناسب، پایداری در دماهای نسبتاً بالا و ضریب اصطکاک پایین به عنوان روانکار در مصارف تریبولوژیکی به پوشش اضافه می‌شوند [۶]. همچنین تحقیقات دانشمندان نشان داده است که انجام عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت، در پوشش‌های الکترولس موجب نانو کریستاله شدن پوشش و بوجود آمدن فازهای سخت در آن گشته و باعث افزایش سختی و مقاومت به سایش این پوشش‌ها می‌گردد [۷]. به همین منظور، هدف از این تحقیق بررسی تأثیر عملیات حرارتی و توزیع نانو ذرات B_4C بر مقاومت به خوردگی و سایش پوشش الکترولس دولایه Ni-P/Ni-B- B_4C است.

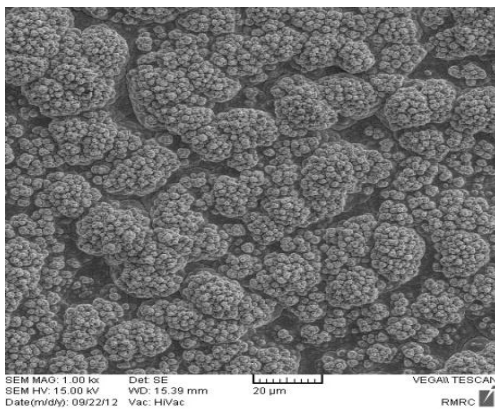
۲- مواد و روش تحقیق

نمونه‌های دیسکی شکل با ضخامت ۵ mm و قطر ۵۰ mm از

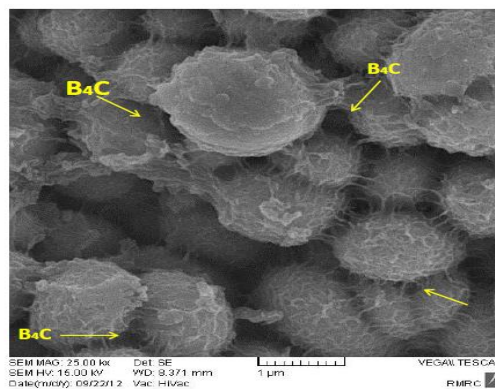
الکتروکلس Ni-B دارای تخلخل زیاد می‌باشند، وجود ذرات B_4C باعث بوجود آمدن مناطق جدید جوانه‌زنی شده که این امر سبب ریزتر شدن ساختار و کاهش تخلخل پوشش می‌شود [۷]. همچنین ساختار پوشش دو لایه نیکل- فسفر / نیکل- بور همانند پوشش تک لایه نیکل- بور است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی رویشی از سطح پوشش: (الف): Ni-P/Ni-B- B_4C ، (ب): Ni-B و (ج): بزرگنمایی بالاتر شکل

الف

دولایه Ni-P/Ni-B- B_4C مطالعات خوردگی روی این پوشش انجام گرفت و با پوشش‌های دو لایه Ni-P/Ni-B و تک لایه Ni-B (با ضخامت یکسان) مقایسه شد. مطالعات مربوط به مقاومت خوردگی پوشش‌ها توسط آزمون پلاریزاسیون Tafel در محلول ۳/۵٪ NaCl توسط دستگاه PARSTAT 2273 انجام گرفت. نمونه‌ها با سطح 1cm^2 در تماس با الکترولیت قرار گرفتند. الکتروپلاتین به عنوان الکتروکد و الکتروکد کالومل اشباع (SCE) به عنوان الکتروکد مرجع به کار گرفته شد. با استفاده از روش برون‌یابی Tafel پتانسیل و دانسیته جریان خوردگی از منحنی‌های Tafel استخراج شد. به منظور بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر روی پوشش دولایه کامپوزیتی، برخی نمونه‌های پوشش داده شده، تحت عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت در اتمسفر خنثی قرار گرفتند. در نهایت جهت بررسی مورفولوژی سطوح نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGAII TESCAN با امکانات EDS و برای تحلیل فازی در سطح نمونه‌ها نیز از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. برای ارزیابی و مقایسه رفتار تریبولوژی نمونه‌ها، از ماشین سایش پین بر روی دیسک استفاده گردید. در همه آزمایش‌های سایش از پین فولادی ۵۲۱۰۰ با سختی حدود ۶۵HRC و قطر ۵mm 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 ۵ نیوتن و مسافت لغزش حداکثر ۱۰۰۰ متر انجام گرفت.

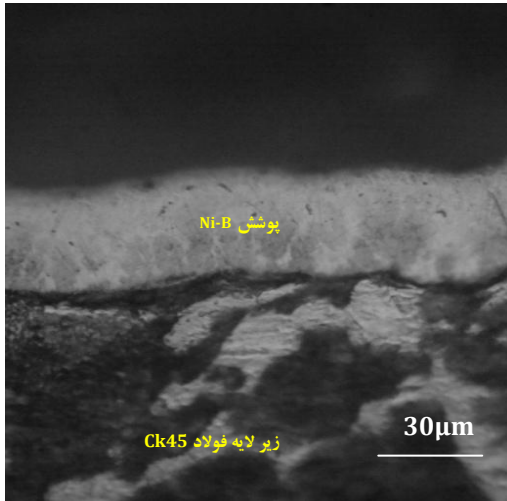
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی مورفولوژی پوشش

مورفولوژی پوشش الکتروکلس Ni-P/Ni-B- B_4C ایجاد شده روی زیر لایه فولادی در شکل ۱ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که سطح پوشش دارای ظاهری کروی شکل شبیه به گل کلم^۳ دارد که برای پوشش‌های الکتروکلس نیکل-بور کاملاً متداول است [۶]. شکل ۱-ج نشان می‌دهد که ذرات B_4C به صورت همگن بر روی سطح پوشش توزیع شده‌اند. پوشش‌های

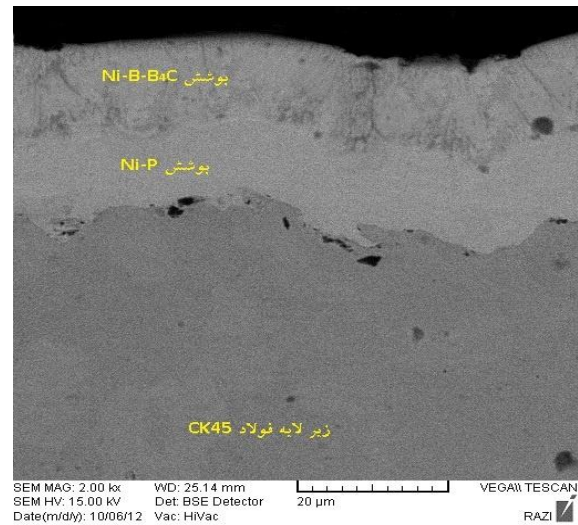
۲-۳- بررسی سطح مقطع پوشش

شکل ۲ سطح مقطع پوشش‌های دولایه Ni-P/Ni-B، کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-B₄C و تک لایه Ni-B را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که پوشش‌های ایجاد شده در این تحقیق بسیار یکنواخت بوده و اتصال خوبی به زیر لایه نشان می‌دهند. در روش الکترولس از جریان خارجی استفاده نمی‌شود، در نتیجه ضخامت پوشش یکنواخت بوده و تمام گوشه‌ها، زاویه‌ها و حفرات نیز شامل این یکنواختی می‌شوند [۸]. ضخامت لایه Ni-P و Ni-B در پوشش‌های دولایه تقریباً برابر ۱۵ μm است. همچنین ضخامت پوشش تک لایه نیکل- بور در حدود ۳۰ میکرون است.



(ج)

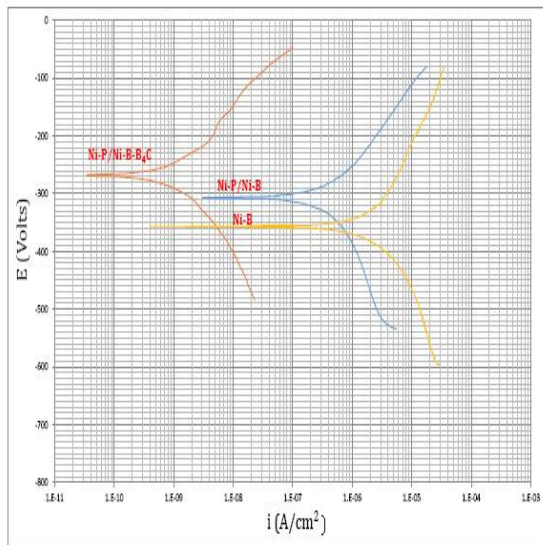
شکل (۲): تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش: (الف): Ni-P/Ni-B-B₄C، (ب): Ni-P/Ni-B و (ج): Ni-B



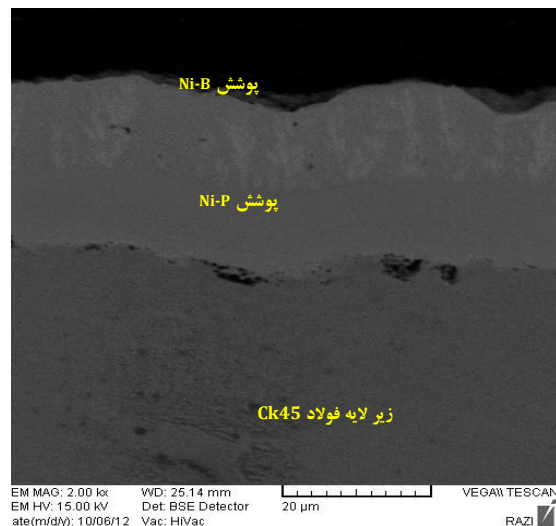
(الف)

۳-۳- بررسی رفتار خوردگی پوشش

نمودارهای پلاریزاسیون Tafel برای پوشش Ni-B، دو لایه Ni-P/Ni-B و کامپوزیتی Ni-P/Ni-B-B₄C در محلول ۳/۵٪ NaCl در شکل ۳ نشان داده شده است. پارامترهای خوردگی مانند پتانسیل خوردگی (E_{corr})، دانسیته جریان خوردگی (i_{corr}) و شیب‌های کاتدی و آنودی Tafel (β_a و β_c) که به وسیله برون‌یابی از نمودارهای پلاریزاسیون Tafel بدست آمده‌اند که در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.



شکل (۳): نمودارهای پلاریزاسیون Tafel پوشش‌ها در محلول ۳/۵٪ NaCl

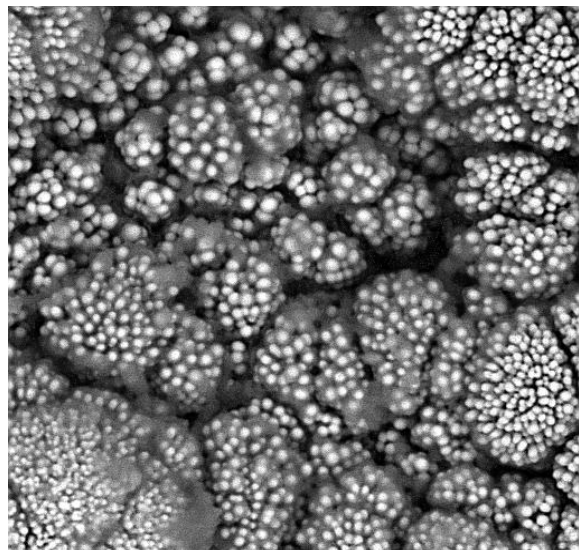


(ب)

جدول (۲): داده های استخراج شده از منحنی پلاریزاسیون پوشش های مورد استفاده در این تحقیق

پوشش	E_{corr} (mV)	I_{corr} (A.cm ⁻²)	β_c (mV/decade)	α (mV/dec β_{ade})
Ni-B	-۴۱۰	۲/۵	-۱۲۰	۱۰۰
Ni-P/Ni-B	-۳۴۵	۱/۸	-۱۴۰	۱۱۰
Ni-P/Ni-B-B ₄ C	-۲۶۰	۱/۳×۱۰ ^{-۳}	-۱۲۰	۸۰

شیارهای موجود در پوشش نیکل- بور باعث کاهش مناطق مستعد به خوردگی گردیده و در نتیجه مقاومت به خوردگی را افزایش می دهد. این مساله به وضوح در شکل ۴ مشخص است.



شکل (۴): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح

مقطع پوشش کامپوزیتی

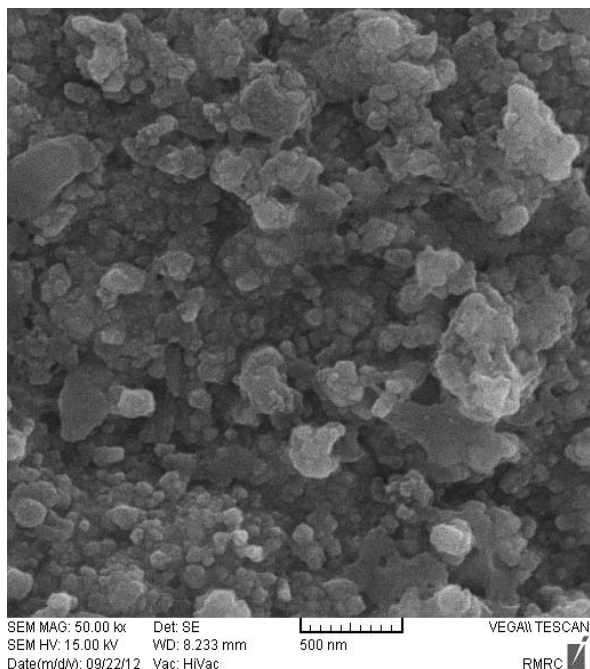
با توجه به نمودارهای تافل موجود در شکل ۳، مشخص است که وجود لایه نیکل- فسفر در پوشش Ni-P/Ni-B باعث بهبود مقاومت به خوردگی این پوشش در مقایسه با پوشش Ni-B شده است. پوشش نیکل- فسفر موجود که به عنوان زیر لایه استفاده می شود با توجه به بالاتر بودن مقاومت به خوردگی آن و همچنین پیوسته بودن ساختار آن نسبت به پوشش نیکل- بور باعث بهبود مقاومت به خوردگی در پوشش دو لایه می شود [۵].

همان طور که مشخص است وجود نانو ذرات B₄C باعث تغییر مکان پتانسیل خوردگی پوشش های کامپوزیتی به سمت نجیب تر شدن می شود. همچنین کاهش دانسیته جریان خوردگی در مقایسه با پوشش Ni-B و پوشش دو لایه Ni-P/Ni-B، به وضوح مشخص است. این مساله نشان می دهد که مقاومت به خوردگی در پوشش های کامپوزیتی بهبود یافته است. به عبارتی، توزیع نانو ذرات B₄C در زمینه پوشش، شیب کاتدی نمودار تافل را کاهش و شیب آنندی را افزایش است. کاهش β_c مربوط به پوشش کامپوزیتی به طور واضح نشان می دهد که نرخ نیم واکنش کاتدی برای لایه Ni-B-B₄C زیاد است. کاهش ولتاژ اضافی هیدروژن روی نانو ذرات B₄C می تواند دلیل اصلی برای کاهش شیب کاتدی نمودار تافل باشد. این مساله همچنین می تواند علت نجیب تر شدن پتانسیل خوردگی پوشش کامپوزیتی در مقایسه با پوشش Ni-B و پوشش دو لایه Ni-P/Ni-B باشد. با توجه به گفته های بالا، آشکار است که نانو ذرات B₄C نقش مهمی در افزایش مقاومت به خوردگی پوشش کامپوزیتی بازی می کنند.

همچنین افزایش مقاومت به خوردگی می تواند در نتیجه رشد یک لایه فشرده B₄C با مقاومت به خوردگی عالی و واکنش پذیری شیمیایی کم در فصل مشترک پوشش- الکترولیت، که می تواند به عنوان یک سد فیزیکی در مقابل خوردگی عمل کند، باشد [۵]. به علاوه، توزیع یکنواخت ذرات B₄C می تواند به بهبود مقاومت به خوردگی به واسطه محدود کردن منطقه ای خوردگی کمک کند [۵]. ذرات B₄C با پر کردن ترک ها و

شکل ۶ الگوی XRD پوشش‌های عملیات حرارتی شده را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر تغییر کامل ساختار نسبت به حالت خام می‌باشد، بدین معنی که به‌جای اثرات آمورف پیک‌های واضحی از دو فاز نیکل کریستالی و بورید نیکل Ni_3B در نمودارهای تفرق مشاهده گردید.

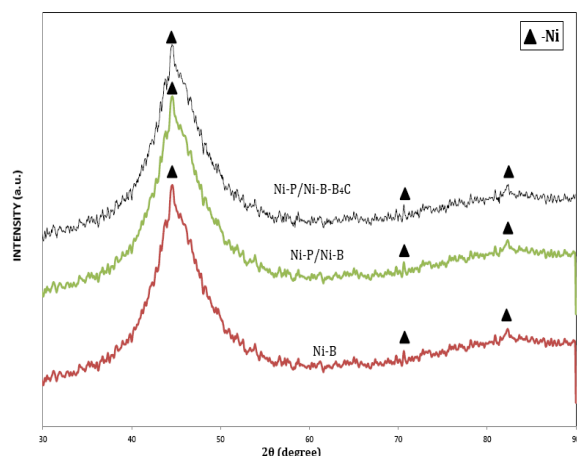
شکل ۷ نشان دهنده مورفولوژی پوشش الکترولس Ni-P/Ni-B- B_4C بعد از عملیات حرارتی می‌باشد. شکل ۱-الف نشان دهنده مورفولوژی پوشش کامپوزیتی قبل از عملیات حرارتی می‌باشد که ساختار آمورف در این شکل به وضوح مشخص است. در حالی که شکل ۷ نشان دهنده ساختار نانو کریستالی پوشش بعد از عملیات حرارتی در دمای $400^\circ C$ به مدت ۱ ساعت است. نتایج حاصل از مورفولوژی پوشش کامپوزیتی (شکل‌های ۱-الف و ۷) با نتایج حاصل از آزمون تفرق اشعه ایکس تطابق خوبی دارد. همچنین به روش دبای-شرر اندازه کریستال‌های نیکل در پوشش مورد محاسبه قرار گرفت که حاکی از اندازه تقریبی ۱۵ نانومتر برای این کریستال‌ها بود.



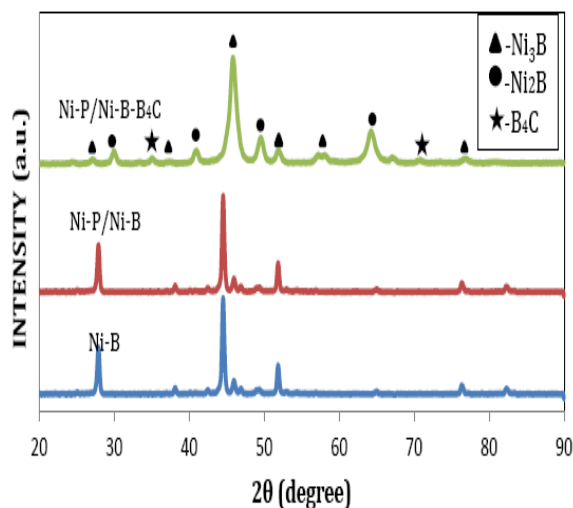
شکل (۷): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی پوشش کامپوزیتی پس از عملیات حرارتی در $400^\circ C$ به مدت ۱ ساعت

۳-۴- تأثیر عملیات حرارتی بر ساختار پوشش

شکل ۵ الگوی پراش پرتو ایکس پوشش‌های ایجاد شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که پوشش‌های ایجاد شده دارای مخلوطی از ریز ساختار آمورف و کریستالی هستند [۹]. پیک‌های نشان داده شده در شکل ۵ از روی هم گرفتار یک پیک زمینه پهن در زوایای تفرق بین ۳۵ تا ۵۵ و یک پیک باریک بدست آمده‌اند. پیک باریک مربوط به پراش (۱۱۱) فاز نانو کریستالی نیکل و پیک پهن مربوط به فاز آمورف پوشش می‌باشد. پیک‌های Ni (۲۰۰) و Ni (۲۲۰) نیز به علت وجود فاز نانو کریستالی ظاهر شده‌اند.



شکل (۵): الگوی پراش پرتو ایکس از پوشش‌های استفاده شده در این تحقیق (قبل از عملیات حرارتی)

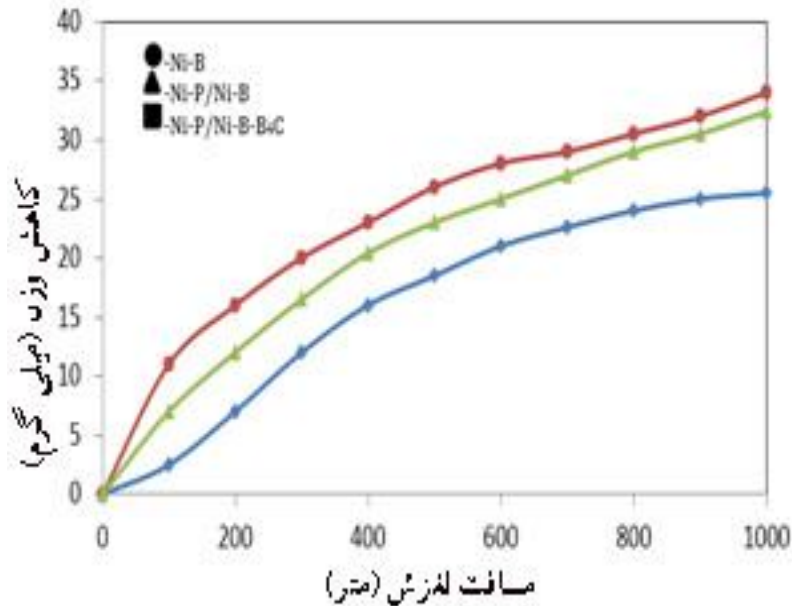


شکل (۶): الگوی پراش پرتو ایکس از پوشش‌های عملیات حرارتی در دمای $400^\circ C$ به مدت ۱ ساعت

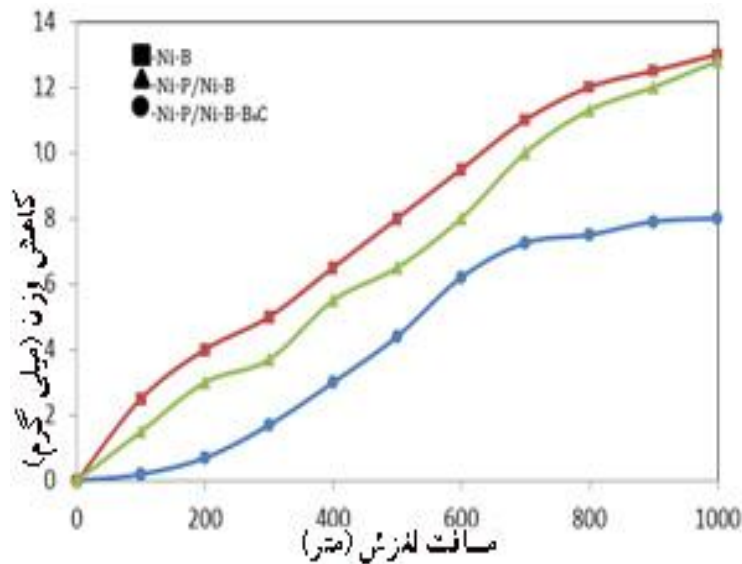
۳-۵- تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار سایشی پوشش

با توجه به نتایج آزمون بارپذیری، آزمون‌های سایش تحت نیروی ۵ نیوتن انجام گردید. منحنی‌های کاهش وزن پوشش‌ها بر حسب مسافت لغزش در شرایط دمای محیط در شکل ۸ نشان داده شده‌است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود نمونه‌های که در دمای 400°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 Ni_3B در طی کریستالیزاسیون فاز آمورف می‌باشد که با توجه به نتایج XRD نیز قابل اثبات است [۱۰].

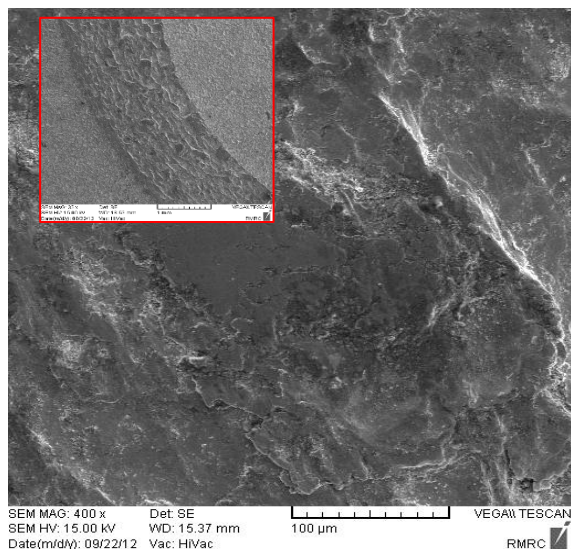


(الف)

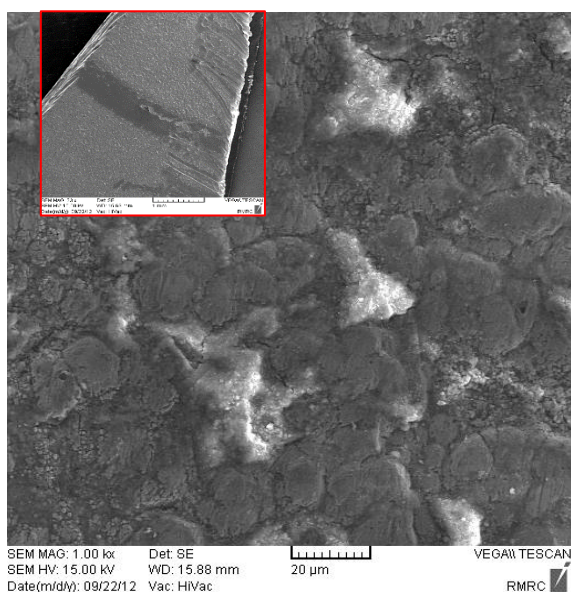


(ب)

شکل (۸): نمودارهای کاهش وزن بر حسب مسافت طی شده پوشش‌های مورد استفاده در این تحقیق: (الف): خام و (ب): بعد از عملیات حرارتی در دمای 400°C به مدت ۱ ساعت



(الف)



(ب)

شکل (۹): تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح سایش یافته پوشش $\text{Ni-P/Ni-B-B}_4\text{C}$: (الف): خام و (ب): بعد از عملیات حرارتی در دمای 400°C به مدت ۱ ساعت

۴- نتیجه گیری

- ۱- مورفولوژی پوشش‌های ایجاد شده به صورت گل کلمی شکل است. همچنین پوشش‌های ایجاد شده بسیار یکنواخت بوده و اتصال خوبی را به زیر لایه نشان دادند.
- ۲- ذرات کاربید بور توانسته اند به خوبی در زمینه پوشش

این شکل نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت به سایش مربوط به پوشش کامپوزیتی $\text{Ni-P/Ni-B-B}_4\text{C}$ عملیات حرارتی شده است. افزایش مقاومت به سایش این پوشش به خاطر کریستاله شدن پوشش و توزیع نانوذرات B_4C در زمینه آن است. شکل ۹ تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح سایش یافته پوشش $\text{Ni-P/Ni-B-B}_4\text{C}$ قبل و بعد از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد.

همان‌طوری که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود سطح سایش یافته نمونه قبل از عملیات حرارتی به دلیل عدم تشکیل فاز کریستالی تغییر شکل پلاستیکی در آن رخ داده که نتیجه این تغییر شکل پلاستیک، 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 [۶].

شکل ۹-ب نشان می‌دهد که عملیات حرارتی در دمای 400°C به مدت ۱ ساعت باعث تجزیه ساختار آمورف به نیکل کریستالی و بورید نیکل شده و سطح سایش کاهش یافته است. تصویر SEM این نمونه، نشان داد که، پوشش دولایه کامپوزیتی $\text{Ni-P/Ni-B-B}_4\text{C}$ حتی پس از مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر، بر روی سطح این نمونه باقی مانده است.

نتایج حاصل از آزمون سایش پوشش کامپوزیتی با نتایج حاصل از مورفولوژی و آنالیز تفرق اشعه ایکس این پوشش تطابق خوبی دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان گفت که ایجاد پوشش الکترولس دولایه $\text{Ni-P/Ni-B-B}_4\text{C}$ روی فولاد ساده کربنی Ck45 با توجه به بهبود همزمان مقاومت به سایش و خوردگی می‌تواند کاربردهای این فولاد را گسترش دهد.

- [7] 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.
- [8] Z. Abdel Hamid & H. B. Hassan, "Influence of deposition temperature and heat treatment on the performance of electroless Ni-B films", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 2348-2354, 2010.
- [9] ASM International Handbook: Alloy Phase Diagrams, 9ed, ASM International, Vol. 3, pp. 1216-1221, 1994.
- [10] T. Biestek, "Electroless Nickel Coatings: Testing of Corrosion and Wear Resistance", *Galvanotechnic*, Vol. 88, No. 5, pp. 1488-1494, 1997.

۷- پی نوشت

- [1] Boron Carbide
[2] Schloetter
[3] Cauliflower

کامپوزیتی جای بگیرند و به صورت همگن در آن توزیع شوند.

۳- عملیات حرارتی در دمای 400°C به مدت ۱ ساعت باعث ایجاد ساختار نانو کریستالی شده و بنابراین مقاومت به سایش پوشش به دلیل تغییر ساختار و ایجاد فاز سخت Ni_3B افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت به سایش مربوط به پوشش دولایه کامپوزیتی عملیات حرارتی شده است.

۴- حضور لایه الکترولس نیکل- فسفر و توزیع ذرات B_4C در لایه Ni-B باعث بهبود مقاومت به خوردگی پوشش Ni-P/Ni-B- B_4C می‌شود. اضافه کردن نانو ذرات B_4C باعث پر شدن شیارها و حفرات موجود در پوشش شده و این مساله سبب کاهش مناطق مستعد به خوردگی و افزایش مقاومت به خوردگی پوشش می‌گردد.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] J. P. Ge, R. X. Che & X. Z. Wang, "Structure and properties of electroless Ni-P- B_4C composite coatings", *Plat. Surf. Finish*, Vol. 85, pp. 69-73, 1998.
- [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] G. O. Mallory, J. B. Hajdu, "Electroless Plating-Fundamentals and Applications", reprint ed., *AESF*, New York, 2002.
- [5] M. Alishahi, S. M. Monirvaghefi, A. Saatchi & S. M. Hosseini, "The effect of carbon nanotubes on the corrosion and tribological behavior of electroless Ni-P-CNT composite coating", *Applied Surface Science*, Vol. 258, pp. 2439-2446, 2012.
- [6] M. Ebrahimian-Hosseiniabadi, K. Azari-Dorcheh & S. M. Monirvaghefi, "Wear behavior of electroless Ni-P- B_4C composite coatings", *Wear*, Vol. 260, pp. 123-127, 2006.