



مقایسه رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های الکترولس نیکل - فسفر با درصدهای مختلف فسفر بر روی زیرلایه فولاد زنگ‌زن مارتنزیتی

امیر توحیدی مقدم^۱، سید محمود منیر واقفی^۲، سیده راضیه انوری^۳

^۱. اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد (دانشجوی کارشناسی ارشد)

^۲. اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد (دانشیار)

^۳. اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد (دانشجوی دکتری)

چکیده

در این تحقیق، پوشش‌های نیکل - فسفر با درصدهای مختلف فسفر با استفاده از روش الکترولس بر روی زیر لایه‌هایی از جنس فولاد زنگ‌زن مارتنزیتی گروه ۴۱۰ ایجاد و تاثیر عملیات حرارتی بر روی سختی و رفتار سایشی آن‌ها بررسی شده است. به این منظور پوشش‌های الکترولس نیکل - فسفر با ضخامت ۳۰ میکرون روی سطح نمونه‌هایی از جنس فولاد زنگ‌زن مارتنزیتی اعمال شد. جهت ارزیابی خواص پوشش‌های ایجاد شده، ضخامت پوشش‌های مختلف همگی یکسان و برابر ۳۰ میکرون انتخاب گردید. برخی از نمونه‌های پوشش داده شده تحت عملیات حرارتی به مدت ۱ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. مشخصه یابی پوشش به کمک آنالیز پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت پذیرفت. جهت بررسی رفتار تریبولوژیکی پوشش‌ها آزمون میکرو سختی و یکرز تحت بار ۱۰۰ گرم و آزمون سایش پین بر روی دیسک تحت نیروی ۲۰ نیوتن انجام شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد که در پوشش‌های خام، پوشش با درصد فسفر پایین بالاترین سختی و مقاومت به سایش را دارا است. همچنین عملیات حرارتی پوشش‌ها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت منجر به تغییر ساختار از حالت آمورف به کریستالی و ایجاد فاز کریستالی Ni₃P شده که در نهایت باعث افزایش سختی و مقاومت به سایش می‌گردد. در پوشش‌های عملیات حرارتی شده، بالاترین سختی و مقاومت به سایش به پوشش با درصد فسفر بالا مربوط است.

واژه‌های کلیدی: پوشش؛ الکترولس نیکل - فسفر؛ سختی؛ مقاومت به سایش؛ عملیات حرارتی

مقدمه

فولاد زنگ نزن مارتنزیتی به دلیل مقاومت به خوردگی بالا در محیط های آبی و همچنین دارا بودن سختی نسبتا مناسب از جمله مواد اصلی جهت ساخت ایمپلر پمپ های مورد استفاده در بویلرهای نیروگاهی محسوب می شود [۱]. اما از آنجایی که ایمپلر با سرعت بالا در حال چرخش است و سیال مدام در حال تماس با ایمپلر می باشد، منجر به سایش شدید بر روی لبه تیغه های ایمپلر می گردد. به همین منظور استفاده از یک پوشش با خواص تریبولوژیکی مناسب ضروری است. یکی از راه های بهبود خواص تریبولوژیکی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی، استفاده از فرایند پوشش دهی به روش الکترولس نیکل - فسفر به علت سختی و مقاومت به سایش بالا و یکنواختی پوشش ایجاد شده است.

فرایند الکترولس نیکل در سال ۱۹۴۶ توسط برنر^۱ و ریدل^۲ ارائه گردید. در فرایند پوشش دهی به روش الکترولس، رسوب فلز به وسیله احیا یون های فلزی موجود در حمام توسط عوامل احیا کننده و بدون نیاز به جریان الکتریکی خارجی انجام می شود. پوشش های الکترولس نیکل - فسفر به دلیل خواص نظیر سختی و مقاومت به سایش بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، توانایی ایجاد بر روی مواد عایق و یکنواختی سطحی پوشش به گونه ای که قابلیت شکل گیری در لبه ها و مناطق داخلی اشکال پیچیده هندسی را دارند، جایگاه وسیعی را در صنایع مختلفی نظیر نفت و گاز، صنایع نظامی و صنایع الکترونیکی به خود اختصاص داده اند. پوشش های الکترولس نیکل - فسفر بر حسب مقدار درصد فسفرشان به سه دسته کم فسفر (۵-۲ درصد وزنی) با ساختار کریستالی، فسفر متوسط (۹-۶ درصد وزنی) با ساختار کریستالی و آمورف و پوشش با درصد فسفر بالا (۱۴-۱۰ درصد وزنی) با ساختار آمورف تقسیم بندی می شوند. سختی و مقاومت به سایش پوشش های الکترولس نیکل - فسفر را می توان از طریق انجام عملیات حرارتی بالا برد. عملیات حرارتی متداول و مناسب برای این پوشش ها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت است [۲ و ۳]. البته بسته به نوع زیر لایه ممکن است دمای عملیات حرارتی بالاتر و یا پایین تر از ۴۰۰ درجه سانتی گراد انتخاب گردد [۴].

رفتار تریبولوژیکی پوشش های الکترولس نیکل - فسفر به شدت متاثر از درصد فسفر در پوشش و انجام عملیات حرارتی بر روی آن است [۵]. هدف از این پژوهش بررسی رفتار تریبولوژیکی پوشش های الکترولس نیکل - فسفر در درصدهای مختلف فسفر در حالت بدون انجام عملیات و با انجام عملیات حرارتی بر روی زیر لایه از جنس فولاد زنگ نزن مارتنزیتی گروه ۴۱۰ مورد استفاده در ایمپلر پمپ های نیروگاهی و انتخاب پوشش مناسب از میان پوشش های انتخاب شده از نظر رفتار تریبولوژیکی است.

مواد و روش تحقیق

قطعاتی دیسکی شکل به قطر ۵ cm و به ضخامت ۴ mm از جنس فولاد زنگ نزن مارتنزیتی گروه ۴۱۰ برای

^۱ Brenner

^۲ Riddell

پوشش دهی مورد استفاده قرار گرفتند. آماده‌سازی نمونه‌ها قبل از پوشش دهی به ترتیب زیر بود:

۱. سنباده زنی نمونه‌ها با استفاده از کاغذ سنباده حاوی ذرات SiC تا شماره ۱۲۰۰
 ۲. چربی زدایی در یک محلول قلیایی به مدت ۲ دقیقه
 ۳. اسید شویی نمونه‌ها به منظور حذف لایه‌های اکسیدی در محلول ۶ درصد حجمی هیدروکلریک اسید به مدت ۱ دقیقه
 ۴. اسید شویی نمونه‌ها در محلول ۳۷ درصد حجمی هیدروکلریک اسید به مدت ۲ دقیقه
 ۵. ایجاد لایه نازکی از نیکل با استفاده از حمام استریک نیکل با اعمال جریان ۱۰ آمپر بردسی مترمربع به مدت ۲ دقیقه بعد از اتمام هر یک از مراحل بالا، نمونه‌ها توسط آب مقطر شستشو داده شدند. بعد از اتمام مراحل آماده‌سازی، نمونه‌ها بلافاصله وارد حمام آبکاری الکترولس نیکل - فسفر شدند.
- حمام مورد استفاده برای پوشش الکترولس نیکل - فسفر از سری shv^۰ ساخت شرکت اشل و تر^۱ آلمان بوده که در جدول ۱ دما و pH مورد استفاده برای سه نوع پوشش مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است. جهت یکسان بودن شرایط، تمامی نمونه‌ها به ضخامت ۳۰ میکرون پوشش داده شدند. به منظور بررسی تاثیر عملیات حرارتی روی پوشش‌ها، برخی از نمونه‌های پوشش داده شده تحت عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت به وسیله کوره الکتریکی تحت اتمسفر کنترل شده قرار گرفتند.
- برای بررسی مورفولوژی سطح پوشش‌ها و شناسایی عناصر موجود در پوشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل XL۳۰ و برای شناسایی فازهای موجود در پوشش‌های ایجاد شده و تاثیر عملیات حرارتی بر روی آن‌ها از دستگاه پراش پرتو ایکس فیلیپس مدل Xpert-MPD با مشخصات پرتو تابشی Cu-K α ، طول موج ۰/۱۲۴ نانومتر استفاده گردید. سختی نمونه‌ها توسط دستگاه سختی سنج ویکرز مدل ۵۱۰۱ Buehler تحت بار ۱۰۰ گرم به مدت ۱۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. به منظور افزایش دقت و اعتبار نتایج آزمون میکروسختی، این آزمون ۵ مرتبه بر روی نمونه‌های مشابه تکرار و میانگین نتایج گزارش گردید. برای ارزیابی و مقایسه رفتار تریبولوژیکی نمونه‌ها، از دستگاه سایش پین بر روی دیسک استفاده گردید. پین‌های مورد استفاده در آزمون سایش از نوع فولادی ۵۲۱۰۰ با سختی RC ۶۵ و قطر ۵ mm بود که به عنوان ماده ساینده مورد استفاده واقع شد. آزمون سایش در اتمسفر هوا در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، تحت سرعت لغزش ۰/۲ m.s^{-۱}، نیروی ۲۰ نیوتن و مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر انجام گرفت.

نتایج و بحث

بررسی مورفولوژی و سطح مقطع پوشش‌ها

تصویر SEM از مورفولوژی پوشش‌های ایجاد شده بر روی زیر لایه از جنس فولاد زنگ نزن مارتزیتی در شکل ۱ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که مورفولوژی این پوشش‌ها به صورت گل کلمی است که برای

^۱ Schlotter

پوشش های نیکل - فسفر متداول است [۲، ۳ و ۵]. در شکل ۲ تصویری از سطح مقطع پوشش الکترولس حاوی درصد فسفر پایین به عنوان نمونه ای از پوشش های الکترولس نیکل - فسفر که توسط میکروسکوپ نوری گرفته شده است، نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیداست، این پوشش ها به صورت بسیار یکنواخت بر روی زیر لایه رسوب کرده و اتصال خوبی به زیر لایه دارند. این شکل نشان می دهد که ضخامت پوشش های ایجاد شده حدود ۳۰ میکرون است.

بررسی آنالیز عنصری

تصاویری از نتایج آنالیز عنصری به روش EDS برای سه نوع پوشش با درصد فسفر کم (L)، درصد فسفر متوسط (M) و درصد فسفر بالا (H) در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج مربوط به درصد وزنی فسفر موجود در پوشش در جدول ۲ مشاهده می شود. مطابق با این جدول، درصد فسفر در پوشش کم فسفر حدود ۳/۲، در پوشش با فسفر متوسط ۶/۶۳ درصد وزنی و در پوشش با فسفر بالا ۱۲/۶۱ درصد وزنی است. مطابق این جدول می توان دریافت که شرایط انتخابی از نظر pH و دما برای ایجاد پوشش های مختلف در هر سه دسته پوشش های الکترولس مناسب بوده است و سه نوع پوشش کم فسفر، فسفر متوسط و فسفر بالا با یک نوع حمام الکترولس با تنظیم pH و دما با موفقیت ایجاد شدند.

بررسی آنالیز فازی و ساختار پوشش

الگوی پراش پرتو ایکس پوشش های ایجاد شده در حالت بدون عملیات حرارتی در شکل ۴ ارائه شده است که ۴-الف، ۴-ب و ۴-ج به ترتیب مربوط به پوشش با درصد فسفر بالا (H)، درصد فسفر متوسط (M) و درصد فسفر کم (L) هستند. در شکل ۴-الف و ۴-ب یک پیک پهن در زاویه $2\theta = 45^\circ$ قرار گرفته که نشان دهنده ساختار آمورف است [۶]. با مقایسه این پیک در پوشش با درصد فسفر بالا (H) نسبت به پوشش با درصد فسفر متوسط (M) می توان به این نتیجه رسید که پهنای پیک حاصله از پراش پرتو ایکس پوشش H بیشتر از پوشش M بوده و در نتیجه ساختار حاصله از پوشش H کاملاً آمورف است. در صورتی که ساختار پوشش M ترکیبی از آمورف و کریستالی است. در شکل ۴-ج یک پیک نوک تیز در زاویه $2\theta = 45^\circ$ واقع شده است که نشان دهنده تشکیل کریستال های نیکل در پوشش L است. الگوی پراش پرتو ایکس پوشش های ایجاد شده در حالت عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت در شکل ۵ ارائه شده است. شکل های ۵-الف، ۵-ب و ۵-ج به ترتیب مربوط به پوشش با درصد فسفر کم (L)، درصد فسفر متوسط (M) و درصد فسفر بالا (H) هستند. پیک های مربوط به پوشش های L و M شامل فاز Ni کریستالی به همراه پیک های ضعیفی از فاز Ni₃P است که تفاوت عمده این دو پوشش را می توان در شدت پیک های نیکل مشاهده کرد. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود درصد نیکل در پوشش L بیشتر از پوشش M است. بررسی الگوهای پراش ارائه شده در شکل ۵ نیز تایید کننده بیشتر بودن میزان نیکل در پوشش L در مقایسه با پوشش M است. در پوشش H تعداد و شدت پیک های مربوط به فاز Ni₃P نسبت به دو پوشش دیگر بیشتر است که نشان دهنده تشکیل مقدار بیشتری از Ni₃P در ساختار این پوشش است.

بررسی سختی و رفتار سایشی پوشش

جدول ۳ سختی زیر لایه و پوشش‌های ایجاد شده در حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی را در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشخص است، سختی پوشش‌ها بعد از عملیات حرارتی افزایش چشمگیری یافته است که این افزایش سختی مربوط به رسوب فاز پایدار بین‌فلزی Ni₃P در طی کریستالیزاسیون فاز آمورف است. شایان ذکر است که فاز Ni₃P استحکام و مدول برشی بالایی دارد که باعث اثرگذاری روی سختی این پوشش‌ها می‌شود [۸]. از میان پوشش‌های خام پوشش L بالاترین سختی را دارد. علت آن کریستالی بودن ساختار است که موجب سختی بالاتر نسبت به پوشش آمورف H و پوشش نیمه آمورف-نیمه کریستالی M شده است. در رابطه با پوشش‌های عملیات حرارتی شده، پوشش H بالاترین سختی را داراست که می‌توان علت آن را در تشکیل بیشتر مقدار فاز کریستالی و سخت Ni₃P نسبت به پوشش‌های M و L دانست.

با توجه به نتایج آزمون بار پذیری آزمون‌های سایش در بار ۲۰ نیوتن انجام گرفت. نمودار کاهش وزن زیر لایه و نمونه‌های پوشش داده شده بر حسب مسافت لغزش در شرایط دمای محیط در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زیر لایه بیشترین کاهش وزن را داراست. از میان نمونه‌های پوشش داده شده، نمونه H در حالت عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت کمترین کاهش وزن و نمونه H در حالت خام یا بدون عملیات حرارتی بیشترین کاهش وزن را نشان می‌دهد. همچنین در اثر عملیات حرارتی پوشش‌ها کاهش وزن نمونه‌ها به طور چشمگیری کاهش یافته است که این نتیجه ناشی از رسوب فاز پایدار بین‌فلزی Ni₃P در طی کریستالیزاسیون فاز آمورف است که با توجه به نتایج آزمون ریز سختی و XRD نیز قابل اثبات است [۶]. نتایج حاصل از نمودارهای کاهش وزن با نتایج حاصل از آزمون ریز سختی مطابقت خوبی دارد.

شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح سایش یافته پوشش‌های H و L را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در شکل‌های ۷-الف، ۷-ج مشاهده می‌شود مکانیزم عمده سایش در این پوشش‌ها که مربوط به قبل از عملیات حرارتی پوشش است، از نوع سایش چسبان است. از مشخصه‌های این سایش تشکیل برخی حفرات توخالی و مناطق کنده شده در کنار مناطق تغییر فرم یافته شدید است [۹ و ۱۰]. البته سایش پوشش H نسبت به M و L شدیدتر بوده که این به خاطر سختی پایین آن و عدم تشکیل فاز کریستالی به خاطر طبیعت آمورف آن است. شکل ۷-ب و ۷-د سطح سایش پوشش‌های H و L را بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت نشان می‌دهد. عملیات حرارتی موجب تبدیل فاز آمورف به نیکل کریستالی و فاز میانی Ni₃P می‌شود. با بررسی اثر سایش پوشش‌های عملیات حرارتی شده شاهد حضور شیارهای ممتد همراه با ترک‌هایی عمود بر جهت سایش هستیم که برخی از ترک‌ها عمیق بوده و موجب حذف قسمتی از پوشش شده‌اند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که در اثر عملیات حرارتی مکانیزم سایش از چسبان به خراشان تبدیل شده است [۹ و ۱۰]. البته در پوشش H به علت سختی بسیار بالای پوشش ترک‌های بیشتری در آن ایجاد شده است.

این مشاهدات با نتایج آزمون‌های ریز سختی، XRD و کاهش وزن نمونه‌ها تطابق خوبی دارد.

نتیجه‌گیری

(۱) با توجه به نتایج آنالیز XRD عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت موجب تبدیل فاز آمورف به نیکل کریستالی و فاز میانی Ni_۳P می‌شود که در پوشش H به دلیل درصد فسفر بیشتر، پس از عملیات حرارتی مقدار فاز Ni_۳P بیشتری ایجاد شده است و این می‌تواند یکی از دلایل افزایش چشمگیر سختی این پوشش باشد.

(۲) سختی و مقاومت به سایش پوشش‌های الکترولس نیکل- فسفر بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت به علت تبدیل فاز آمورف به نیکل کریستالی و فاز بین فلزی سخت Ni_۳P افزایش یافته است. پوشش H عملیات حرارتی شده بالاترین سختی و کمترین کاهش وزن را در بین تمامی پوشش‌ها داراست.

(۳) مکانیزم سایش پوشش‌های نیکل- فسفر قبل از عملیات حرارتی از نوع چسبان است که در پوشش H این مکانیزم با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد. در اثر عملیات حرارتی مکانیزم سایش به خراشان تبدیل می‌شود که حضور شیارهای ممتد همراه با ترک عمود بر جهت سایش از ویژگی‌های آن است. در پوشش H به علت سختی بسیار بالای پوشش ترک‌های عمود بر جهت سایش بیشتر دیده می‌شود.

(۴) استفاده از پوشش الکترولس نیکل- فسفر بر روی زیر لایه از جنس فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی گروه ۴۱۰ باعث بهبود چشمگیر سختی و مقاومت به سایش آن می‌شود.

مراجع

۱. J. R. Davis, *Alloy digest source book: stainless steel*, ASM International, ۱۹۰۰.
۲. P. Sahoo, S. K. Das, "Tribology of electroless nickel coatings- A review", *Materials & Design*, ۳۲, ۲۰۱۱, ۱۷۶۰-۱۷۷۵.
۳. J. Sudagar, J. Lian, W. Sha, "Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings - A critical review", *Journal of Alloys and Compounds*, ۵۷۱, ۲۰۱۳, ۱۸۳-۲۰۴.
۴. M. Novak, D. Vojte, P. Novak, T. Vitu, "Tribological properties of heat-treated electroless Ni-P coatings on AZ⁹¹ alloy", *Applied Surface Science*, ۲۵۷, ۲۰۱۱, ۹۹۸۲-۹۹۸۵.
۵. N. Kanani, *Electroplating Basic principles*, Processes and practice, Elsevier Ltd, Berlin, ۲۰۰۴.
۶. G. Jiaqiang, W. Yating, L. Lei, Sh. Bin, H. Wenbin, "Crystallization temperature of amorphous electroless nickel-phosphorus alloys", *Materials Letters*, ۵۹, ۲۰۰۵, ۱۶۶۵-۱۶۶۹.
۷. H.S. Yu, W. Sha, R. Elansezhan, "A comparative study on the crystallization behavior of electroless Ni-P and Ni-Cu-P deposits", *Surface & Coatings Technology*, ۱۴۸, ۲۰۰۱, ۱۴۳-۱۴۸.
۸. K.G. Keong, W. Sha, S. Malinov, "Crystallisation kinetics and phase transformation behaviour of electroless nickel-phosphorus deposits with high phosphorus content", *Journal of Alloys and Compounds*, ۳۳۴, ۲۰۰۲, ۱۹۲-۱۹۹.
۹. G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor, *Engineering tribology*, Butterworth, Western, ۲۰۰۰.
۱۰. M. Dekker, *wear testing*, Noyes, New York, ۲۰۰۴.

جدول ۱. شرایط انتخاب پوشش بر حسب pH و دما

نوع پوشش	علامت اختصاری	pH	دما (°C)
فسفر پایین	L	۶/۸	۹۰
فسفر متوسط	M	۵/۴	۸۵
فسفر بالا	H	۴/۴	۷۵

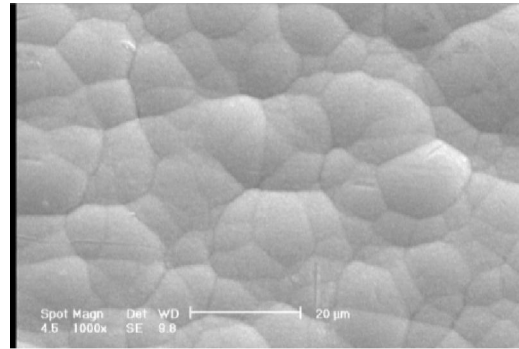
جدول ۲. ترکیب شیمیایی پوشش الکتروولس نیکل - فسفر با درصد فسفر متفاوت

نوع پوشش	درصد وزنی نیکل	درصد وزنی فسفر
فسفر پایین (L)	۹۶/۸	۳/۲
فسفر متوسط (M)	۹۳/۳۷	۶/۶۳
فسفر بالا (H)	۸۷/۳۹	۱۲/۶۱

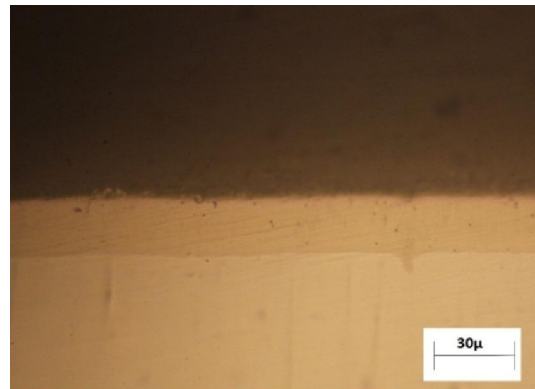
جدول ۳. سختی زیر لایه و پوشش های ایجاد شده در حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه

سانتی گراد به مدت ۱ ساعت بر حسب ویکرز

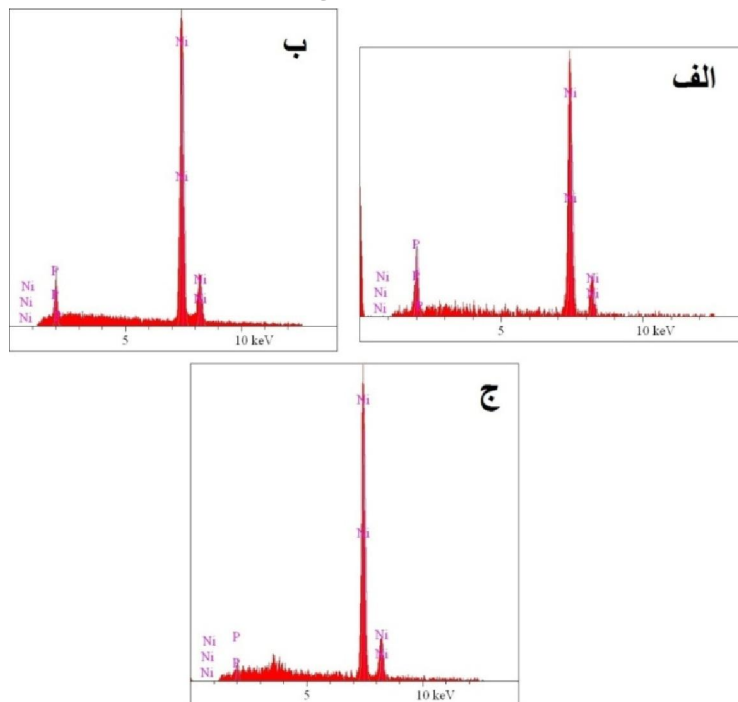
نوع پوشش	سختی در حالت خام	سختی در حالت عملیات حرارتی
زیر لایه	۲۰۰	۳۶۰
فسفر پایین (L)	۷۱۰	۷۵۰
فسفر متوسط (M)	۵۴۰	۸۱۰
فسفر بالا (H)	۴۸۰	۹۵۰



شکل ۱. تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از پوشش الکترولس نیکل - فسفر

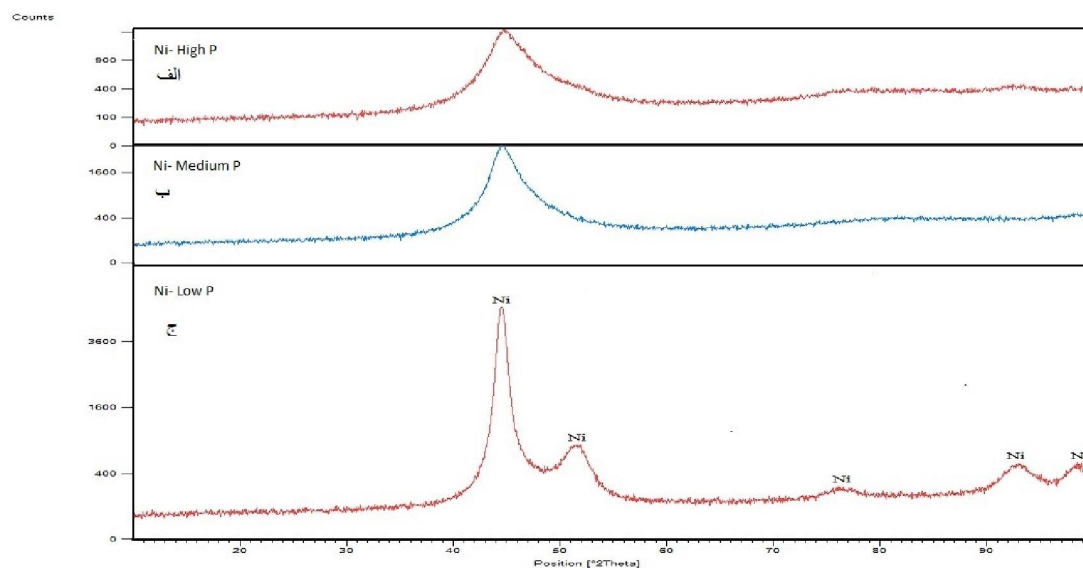


شکل ۲. تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری از سطح مقطع پوشش الکترولس نیکل - فسفر با درصد فسفر پایین

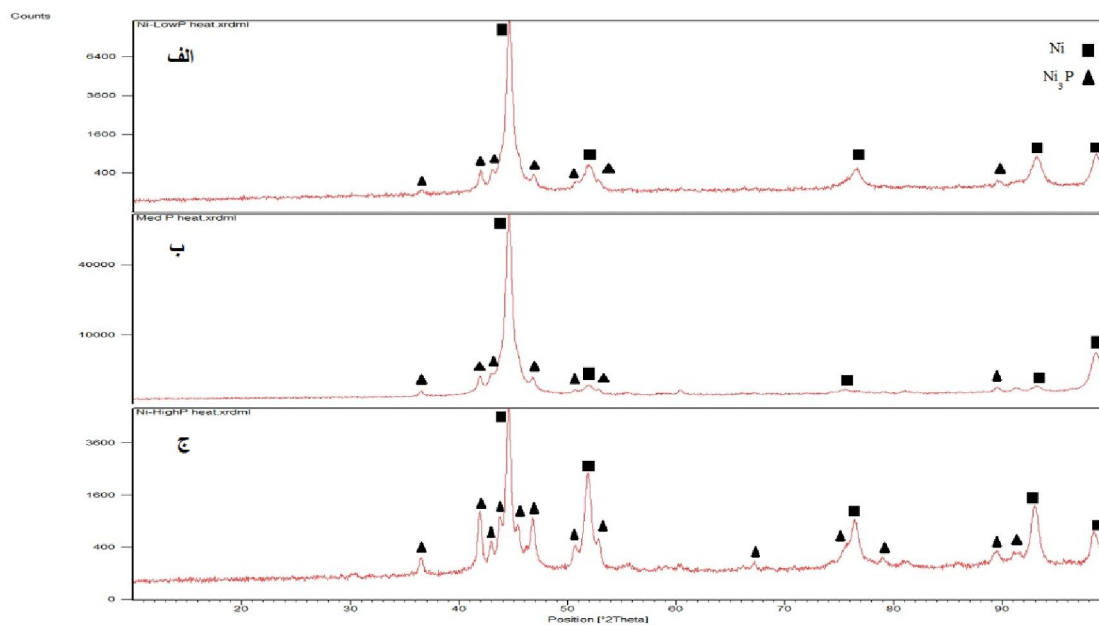


شکل ۳. نتایج آنالیز EDS از پوشش الکترولس نیکل با درصد الف) فسفر بالا ب) فسفر متوسط ج) کم فسفر

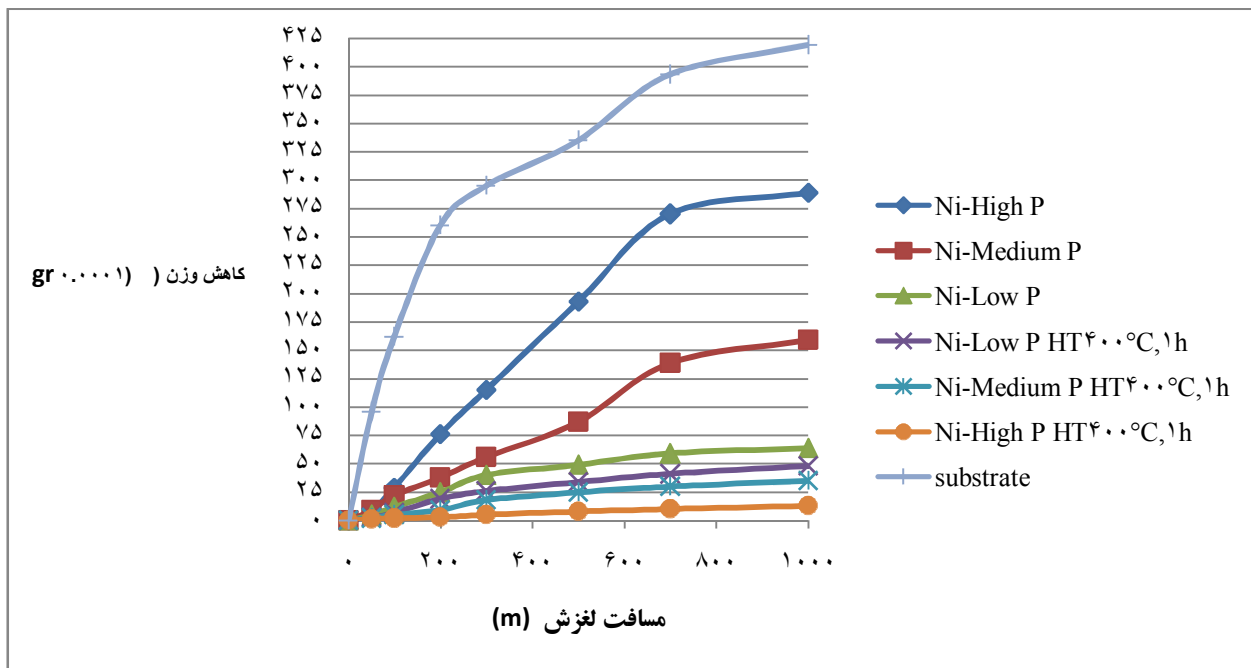
پانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



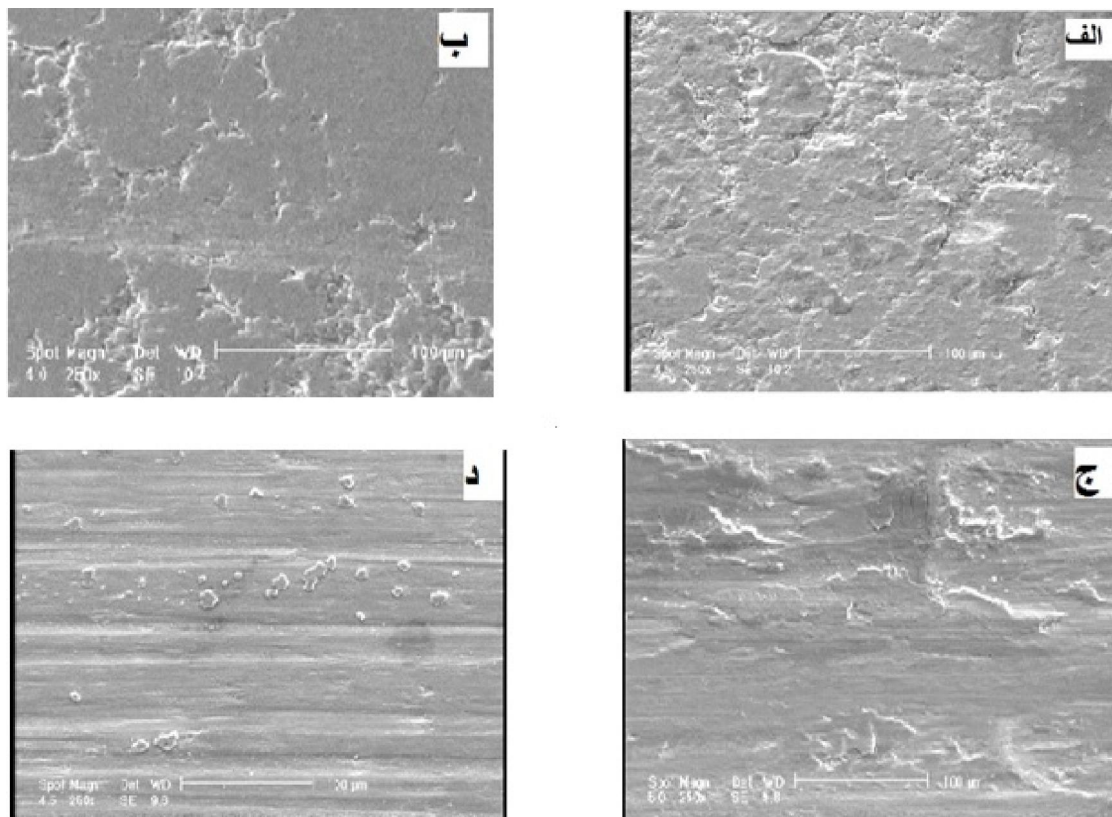
شکل ۴. الگوی پراش پرتو ایکس از پوشش الکترولس نیکل - فسفر با درصد الف) فسفر بالا ب) فسفر متوسط ج) کم فسفر



شکل ۵. الگوی پراش پرتو ایکس از پوشش الکترولس نیکل - فسفر عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت با درصد الف) کم فسفر ب) فسفر متوسط ج) فسفر بالا



شکل ۶. نمودارهای کاهش وزن بر حسب مسافت طی شده نمونه‌های پوشش داده شده و زیرلایه



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح سایش یافته پوشش الف) فسفر بالا ب) فسفر بالای عملیات حرارتی شده در ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت ج) فسفر پایین د) فسفر پایین عملیات حرارتی شده در ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت