

## بررسی اثر زبری زیرلایه بر رفتار سایش در دمای بالای پوشش الکترولس نیکل-فسفر

محمد قادری<sup>۱\*</sup>، سید محمود منیر<sup>۲</sup> واقفی و علی سعیدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد نجف آباد، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، <sup>۳</sup>استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۹۲/۵/۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۲/۷/۲۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۲/۷/۲۷

**چکیده** در این مطالعه پوشش الکترولس Ni-P بر دو نوع زیرلایه ماسه پاشی شده و الکتروپولیش شده در شرایط یکسان آبرکاری شده است. نمونه ها در دمای ۴۰۰°C به مدت یک ساعت در کوره تحت عملیات آنیل قرار داده شده است. آزمون سایش در دمای ۲۵۰°C تحت بار اعمالی ۱۰ نیوتن در سرعت ۰/۵m.s-1 و مسافت ۳۰۰ متر به روش پین روی دیسک انجام شدند. بررسی ریخت شناسی و رفتار سایش نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به همراه آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو اشعه ایکس (EDX) انجام شد. نتایج نشان می دهد سایش در نمونه الکترولس Ni-P با زیرلایه ماسه پاشی شده مقاومت بیشتری دارد و سایش از نوع چسبان می باشد، درحالیکه سایش پوشش با زیرلایه الکتروپولیش با میکروتکرهای زیادی در سطح مسیر سایش است.

**کلمات کلیدی:** الکترولس، Ni-P، سایش، دمای بالا، ماسه پاشی، الکتروپولیش، سختی، سایش چسبیده.

## Effect of roughness of the substrate on High-temperature wear behavior of electroless nickel-phosphorus coatings

Mohammad ghaderi<sup>1\*</sup>, seyed mahamoud monirvaghefi<sup>2</sup> and Ali saeedi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Department of material engineering, Islamic Azad University, Najaf abad branch, Najaf abad, Iran

<sup>2</sup>Assosiate Professor, <sup>3</sup>Professor, Department of material engineering, Isfahan University of Technology, Iran

**Abstract** In this study, electroless coating of nickel-phosphorus on two types of substrates, i.e. sand-blasted and electropolished samples, were applied. Both samples were annealed at 400°C for one hour in a heat treatment oven. The pin-on-disk wear tests were carried out at 250°C under normal load of 5N and sliding speed of 0.5 m/s with a sliding distance of 300 m. Morphology and wear behavior of the samples were studied by a scanning electron microscope equipped with energy dispersive X-ray spectroscopy analysis device (EDX). Results indicate that electroless Ni-P coating on the sand blasted substrate is more wear resistance than that on the electropolished substrate, wear type for the former is adhesive and the worn sample of the latter coating contained a lot of micro-cracks.

**Keywords:** Electroless Ni-P coating, high temperature wear, sand-blast, electropolish, hardness, abrasive wear.

\*عهده دار مکاتبات: محمد قادری

نشانی: اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد / نجف آباد بلوار دانشگاه صندوق پستی ۸۵۱۳۵-۵۱۷

تلفن: ۰۹۱۳۳۱۷۰۲۴۸، پیام نگار: mo.ghaderi@yahoo.com

## ۱- مقدمه

زبری پوشش با افزایش زبری زیرلایه افزایش می‌یابد. سطوح صاف‌تر دارای رفتار سایش بهتری می‌باشد. اگر پوشش خاصیت خود روانکاری داشته باشد می‌تواند ضریب اصطکاک را حداقل نماید. گزارش شده است که فسفر در پوشش‌های الکترولس نیکل فسفر دارای خاصیت روانکاری می‌باشد [۱۶]. رفتار سایش در دمای بالا برای پوشش‌های الکترولس نیکل فسفر با زبری زیرلایه‌های مختلف تا کنون بررسی نشده است، هدف از این پژوهش بررسی رفتار سایش در دمای بالا پوشش الکترولس Ni-P با تغییر زبری ۴ زیرلایه می‌باشد.

## ۲- نحوه آزمایش

## ۲-۱- آماده سازی و پوشش دهی

نمونه‌ها به قطر ۵cm از جنس مس DHP<sup>۵</sup> با مشخصات آنالیز کمی ۰/۰۱ درصد فسفر و ۰/۰۱۵ درصد نقره و مابقی مس بریده شده است. نمونه‌ها به دو دسته زبر و پولیش شده تقسیم بندی شده اند. نمونه زیرلایه زبر به وسیله دستگاه سند بلاست با ذرات ماسه به قطر ۷۰ تا ۱۵۰ میکرون زبر شده و نمونه دیگر توسط محلول اسید فسفریک رقیق با استفاده از یک منبع تغذیه پتانسیل ثابت به مدت ۲۰ دقیقه تحت عملیات زبر سازی قرار داده می‌شود. محلول خورنده باعث خوردگی موضعی و هموار کردن سطح می‌شود. جدول (۱) مشخصات الکتروپولیش را نشان می‌دهد. نمونه‌ها در حمام الکترولس Slotonip A70 شرکت آلمانی Schlatter در حدود ۳۰ میکرون پوشش داده شدند. دو نمونه زبر و پولیش شده به صورت همزمان در pH برابر با ۴/۷ آبکاری شدند. مشخصات و جزئیات حمام آبکاری در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات الکتروپولیش

ولتاژ	زمان	کاتد	آند	محلول
۱ تا ۲/۵ ولت	۲۰-۳۰ دقیقه	316L (ظرف)	مس (نمونه)	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (۷۰ تا ۹۰ %Wt) رقیق در آب

پوشش الکترولس نیکل در سال ۱۹۴۶ در آزمایشگاه‌های BSN<sup>۱</sup> توسط "بره نر" و "گریس ریدل" کشف شدند [۱]. آنها ادعا کردند این نوع پوشش‌ها به صورت خود کاتالیزوری رسوب می‌کنند که برای آبکاری نیازی به اعمال جریان الکتریسیته نیست [۱]. پوشش‌های الکترولس با داشتن خواص منحصر به فرد نظیر مقاومت به سایش و خوردگی بالا در بسیاری از صنایع کاربرد دارد [۲-۵]. سختی پوشش‌های الکترولس Ni-P می‌تواند از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ ویکرز در نوسان باشد [۶-۸].

به طور کلی رابطه‌ی مستقیمی بین مقاومت سایش و سختی سطح پوشش وجود دارد. خواص سایش بر اساس پارامترهای متغیر از قبیل تنش ذاتی، ضخامت، چسبندگی پوشش زیرلایه و مورفولوژی سطح و غیره متاثر می‌شود. عملیات حرارتی تاثیر بسزایی در خواص فیزیکی و مکانیکی پوشش الکترولس نیکل فسفر داشته و باعث بهبود خواص چسبندگی پوشش به زیرلایه می‌شود [۹-۱۱]. سختی پوشش آبکاری الکتریکی نیکل با انجام عملیات حرارتی به علت مکانیزم‌های تبلور مجدد و رشد دانه‌ها، کاهش می‌یابد؛ ولی در پوشش الکترولس نیکل موجب افزایش سختی می‌شود [۱۰]. دما و زمان عملیات حرارتی می‌تواند در سختی پوشش EN<sup>۲</sup> موثر باشد. افزایش سختی می‌تواند در دماهای پایین ولی در زمان‌های طولانی‌تر حاصل گردد که باعث بهبودی توام با سختی و مقاومت به خوردگی خواهد شد [۱۲]. تحقیقات معصومی و همکارانش [۱۳] روی دمای سایش پوشش الکترولس نشان می‌دهد با افزایش دمای سایش نرخ سایش پوشش، کاهش می‌یابد.

یکی از مهمترین مزایای پوشش الکترولس، رسوب یکنواخت پوشش روی زیرلایه‌های ناهموار و غیر مسطح است [۱۴]. افزایش زبری زیرلایه و ضخامت پوشش روی خواص نهایی پوشش الکترولس نیکل توسط ارنست<sup>۳</sup> و همکارانش بررسی شده است [۱۵]. مطالعات آنها نشان می‌دهد افزایش

<sup>۱</sup> - Bureau Standard National

<sup>۲</sup> - Electroless Nickel

<sup>۳</sup> - Ernest

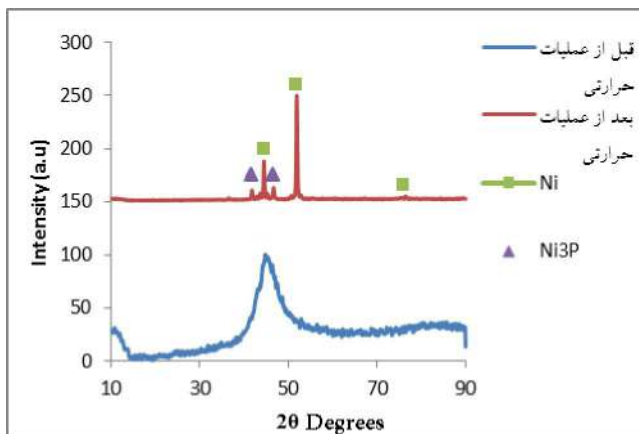
<sup>۴</sup> - roughness

<sup>۵</sup> - Deoxidation High Phosphour

جدول ۲. مشخصات آبکاری الکترولس

اجزای حمام	(g.l <sup>-1</sup> ) سولفات نیکل	۳۰
	(g.l <sup>-1</sup> ) سدیم هیپوفسفات	۳۴
	(g.l <sup>-1</sup> ) سدیم استات	۳۰
	(g.l <sup>-1</sup> ) سدیم سترات	۴۰
	(g.l <sup>-1</sup> ) سرب استات	۱۵×۱۰ <sup>-۶</sup>
شرایط	pH	۴/۷
	دما (°C)	۸۳
	حجم حمام (ml)	۳۰۰
	زمان آبکاری (hr)	۱/۵
	تعداد نمونه	۲
	سرعت چرخش همزن (rpm)	۳۰۰

شکل (۱) منحنی پوشش الکترولس نیکل-فسفر را در شرایط قبل و بعد از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. پوشش در شرایط آبکاری به صورت آمورف رسوب کرده و تنها در ۲θ بین ۴۰° تا ۵۰°، تک پیک با عرض زیاد که نشان دهنده نیکل است ایجاد شده است و بعد از عملیات حرارتی نیکل کریستالی و فازهای بین نشینی Ni<sub>3</sub>P، Ni<sub>2</sub>P و Ni<sub>12</sub>P<sub>5</sub> در منحنی ظاهر شده است.



شکل ۱. منحنی XRD نمونه قبل و بعد از عملیات حرارتی

## ۲-۲- آزمون سایش داغ

سایش نمونه‌ها در دمای ۲۵۰°C تحت بار ۱۰N در سرعت ۰/۵m/s به روش پین روی دیسک با پین فولاد DIN-100CrMn6 با سختی ۶۴RC انجام شد. یک ترموکوپل در زیر نمونه به منظور کنترل دمای نمونه با دقت  $\pm 5^\circ\text{C}$  تعبیه شده است. آزمایش سایش بر روی نمونه‌ها تحت شرایط یکسان صورت گرفت. طول مسافت سایش ۳۰۰ متر انتخاب شد و با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱mg تغییرات وزن نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون اندازه‌گیری شد. نرخ سایش پوشش‌ها بر اساس معادله ۱ بررسی شد [۱۷]. در این معادله  $\Delta m$  تغییرات وزن نمونه بعد و قبل از آزمون سایش بر حسب میلی‌گرم،  $\rho$  چگالی پوشش بر حسب  $\text{mg/mm}^3$  (برای پوشش الکترولس Ni-9%P چگالی  $8 \text{ mg/mm}^3$  می‌باشد)، L طول مسیر لغزش بر حسب متر و F نیروی عمودی وارده بر حسب نیوتن می‌باشد.

$$W_s = \frac{\Delta m}{\rho L F} \quad (\text{معادله ۱})$$

به منظور ارزیابی رفتار سایشی، پوشش‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل (PhilipsML30) و آنالیز کمی EDAX مقایسه شدند.

## ۳- بحث و نتایج

### ۳-۱- مورفولوژی و فازبندی

شکل (۲-الف و ب) به ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی پوشش الکترولس نیکل-فسفر با زیرلایه ماسه پاشی شده از سطح و مقطع پوشش را نشان می‌دهد. به دلیل قرار گیری دو عنصر نیکل و مس در کنار یکدیگر در جدول تناوبی و نیز اختلاف عدد اتمی کم این دو عنصر (عدد اتمی نیکل ۲۸ و عدد اتمی مس ۲۹) کنتراست زیر لایه و پوشش در تصاویر BSE و SE بسیار کم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سطح نمونه پوشش الکترولس دارای برجستگی‌های زیاد شبیه گل کلمی می‌باشد. شکل (۳-الف و ب) به ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی الکترولس نیکل-فسفر با زیرلایه الکتروپولیش شده از سطح و مقطع پوشش را نشان می‌دهد. شکل و مقطع دیده می‌شود. مشاهده می‌شود سطح مقطع نمونه الکتروپولیش شده دارای فصل مشترک صاف می‌باشد. جدول (۳) نتایج آنالیز کمی EDS از سطح پوشش‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان فسفر رسوب کرده در نمونه با زیرلایه ماسه پاشی شده و نمونه الکتروپولیش شده به ترتیب ۸/۹ و ۸/۳ درصد می‌باشد. مطالعات شاو و

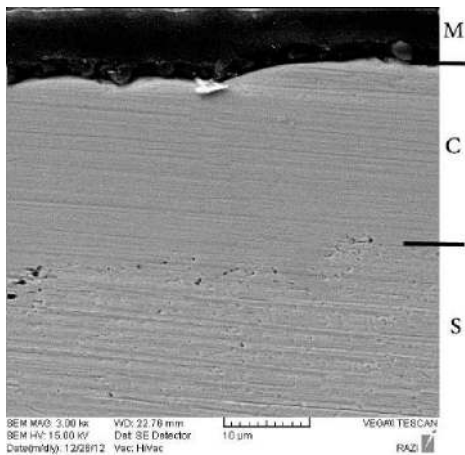
پلاستیک سطحی شده است. بروز برخی میکروتِرک‌های سطحی در تصویر را می‌توان مشاهده نمود. همچنین سایش در دمای بالا برای این نمونه باعث ایجاد موج‌های هم‌جهت مختلف روی خط مسیر سایش گردیده است.

جدول ۳. نتایج EDS از سطح پوشش‌ها

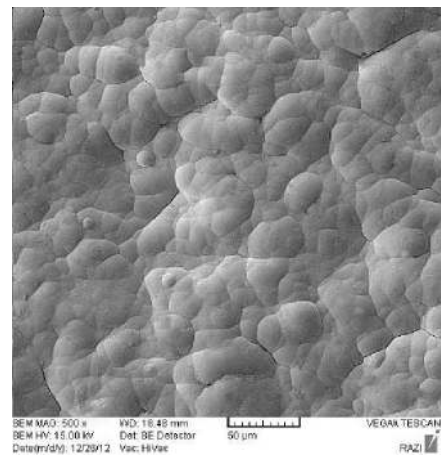
نوع عملیات زیرلایه	%Ni		%P	
	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی
ماسه پاشی	۹۳/۳۰	۸۴/۶۳	۸/۹۴	۱۵/۳۷
الکتروپولیش	۹۳/۹۱	۸۴/۱۲	۸/۳۵	۱۳/۳۱

همکارانش [۱۸] نشان می‌دهد که با افزایش زبری زیرلایه، میزان رسوب فسفر به دلیل افزایش احیای هیپوفسفیت سدیم بر روی سطح افزایش می‌یابد. همچنین گزارشات نشان می‌دهد که با افزایش درصد فسفر در پوشش الکترولس سختی پوشش کاهش می‌یابد. استحاله فسفید نیکل به علت پایین بودن سختی نسبت به نیکل کریستالی منجر به کاهش سختی می‌شود [۱۸].

شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح سایش در دمای بالای پوشش الکترولس Ni-P با زیرلایه ماسه پاشی شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سایش منجر به هموار شدن برجستگی‌های سطحی پوشش گردیده است. اثر سایش در دمای بالا برای پوشش فوق باعث تغییر فرم



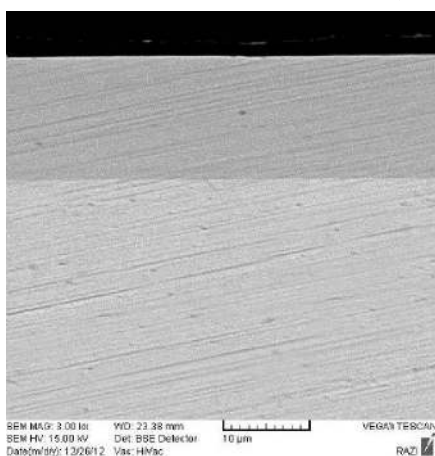
ب



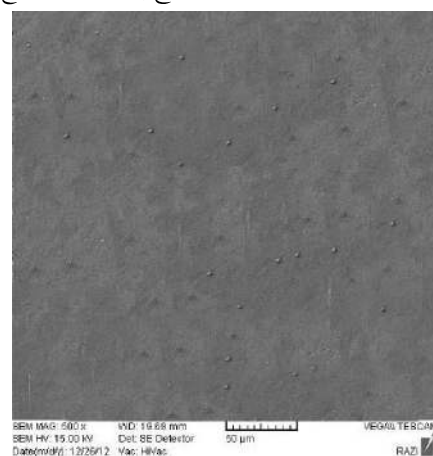
الف

شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی پوشش الکترولس Ni-P با زیرلایه ماسه پاشی؛

(الف) سطح پوشش (ب) مقطع پوشش؛ (M=مانت، C=پوشش S=زیرلایه)



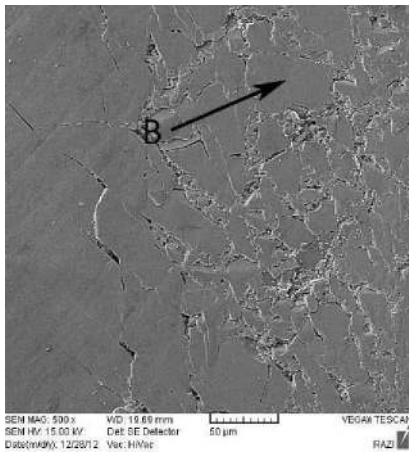
ب



الف

شکل ۳. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی الکترولس Ni-P با زیرلایه الکتروپولیش؛ (الف) سطح پوشش (ب) مقطع پوشش

مرکز خط سایش بیشتر از کناره‌ها می‌باشد و در برخی مناطق باعث خوردشدگی و حذف از سطح شده است. نتایج EDS در نقطه B نشان می‌دهد تنها ۲/۵ درصد اکسیژن در مسیر سایش وجود دارد. میزان اکسیژن در این نمونه نسبت به نمونه پوشش با زیرلایه ماسه پاشی شده کمتر است. کاهش اصطکاک بین پین و سطح پوشش به علت کاهش زبری سطح زیرلایه عامل اصلی کاهش اکسید در سطح می‌توان عنوان نمود. سایش در این نمونه باعث بروز ترکهای زیادی شده است و تخریب پوشش نسبت به نمونه با زیرلایه ماسه پاشی شده بیشتر ایجاد شده است.



شکل ۵. تصویر سایش پوشش الکتروپولیش با زیرلایه الکتروپولیش

جدول (۵) نتایج سختی پوشش‌ها با زیرلایه الکتروپولیش و ماسه پاشی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سختی پوشش الکتروپولیش نیکل-فسفر برای هر دو نوع نمونه قبل از عملیات حرارتی ۵۷۰HV و بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰°C به مدت یک ساعت برای زیرلایه ماسه پاشی شده ۸۵۰HV و برای زیرلایه الکتروپولیش ۸۷۰HV می‌باشد. افزایش سختی پوشش‌ها بعد از

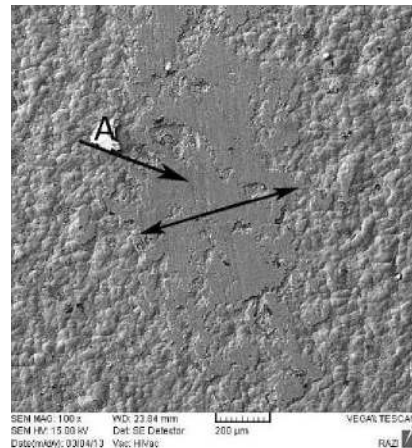
جدول ۵. نتایج سختی پوشش الکتروپولیش Ni-P با دقت  $\pm 5$  ویکرز

نوع عملیات زیرلایه	سختی قبل از عملیات حرارتی [HV]	سختی بعد از عملیات حرارتی [HV]	سختی بعد از سایش [HV]
ماسه پاشی	۵۷۰	۸۵۰	۸۶۰
الکتروپولیش	۵۷۰	۸۷۰	۸۸۵

### ۳-۲- رفتار سایش در دمای بالا

شکل (۶ و ۷) به ترتیب تصاویر تغییر وزن بر حسب میلی‌گرم و نرخ سایش پوشش الکتروپولیش نیکل-فسفر بر اساس معادله

نتایج EDX نقطه A نشان می‌دهد ۶ درصد اکسیژن در مسیر سایش وجود دارد آهن بدست آمده در نتایج EDS به علت سایش پین سایشی روی سطح پوشش می‌باشد. از آنجایی که سختی پوشش الکتروپولیش با زیرلایه الکتروپولیش نسبت به پوشش الکتروپولیش با زیرلایه ماسه پاشی شده بیشتر است، میزان سایش پین روی سطح نمونه ماسه پاشی شده بیشتر اتفاق افتاده است. در جدول (۴) داده‌های EDS از سطح نمونه شکل‌های (۴ و ۵) آورده شده است. سختی پوشش برای هر دو نمونه بعد از آزمون سایش افزایش یافته است. علت افزایش سختی را می‌توان به کریستالی شدن باقی مانده آمورف که در حین عملیات حرارتی به ساختار کریستالی تبدیل نشده‌اند نسبت داد.



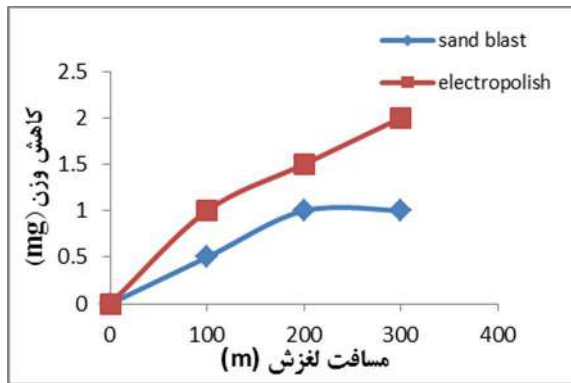
شکل ۴. تصویر سایش در دمای بالای پوشش الکتروپولیش با زیرلایه ماسه پاشی

عملیات حرارتی به علت تشکیل فاز نیکل کریستالی از آمورف می‌باشد [۲۰]. حضور فازهای ناپایدار فسفید نیکل علت اصلی تغییرات سختی در دو نوع پوشش الکتروپولیش با زبری زیرلایه‌های مختلف است.

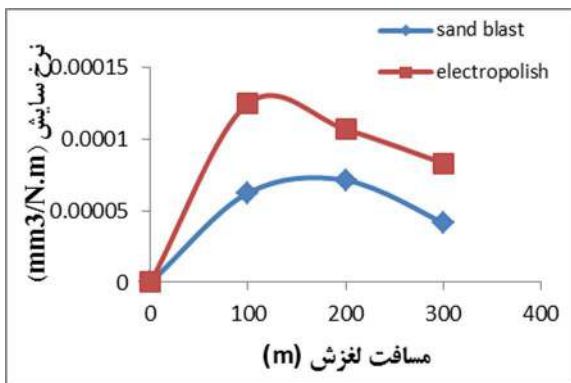
جدول ۴. داده‌های EDX از سطح نمونه‌ها پس از آزمون سایش

نمونه	%Ni	%P	%Fe	%O
نمونه شکل (۴) نقطه A	۸۹	۸/۸	۰/۱	۶/۰۶
نمونه شکل (۵) نقطه B	۹۰/۵	۸/۸	۰/۱۲	۲/۵

شکل (۵) تصویر سایش در دمای بالای پوشش الکتروپولیش نیکل-فسفر با زیرلایه الکتروپولیش شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سایش منجر به ترک خوردگی فراوان روی سطح شده است. ترک خوردگی‌ها در



شکل ۶. منحنی کاهش وزن نمونه‌ها بر حسب مسافت لغزش



شکل ۷. منحنی نرخ سایش نمونه‌ها بر حسب مسافت لغزش

جدول ۶. داده‌های نرخ سایش در دمای بالا برای پوشش الکتروپولیش نیکل

نوع عملیات زیرلایه	فاصله لغزش (m)	کاهش وزن (mg)	نرخ سایش (mm³/N.m)
ماسه پاشی	۱۰۰	۰/۵	$۶/۲۵ \times ۱۰^{-۵}$
	۲۰۰	۱	$۷/۱۴ \times ۱۰^{-۵}$
	۳۰۰	۱	$۴/۱۶ \times ۱۰^{-۵}$
الکتروپولیش	۱۰۰	۱	$۱/۲۵ \times ۱۰^{-۴}$
	۲۰۰	۱/۵	$۱/۰۷ \times ۱۰^{-۴}$
	۳۰۰	۲	$۸/۳۳ \times ۱۰^{-۵}$

### تشکر و قدردانی

در پایان از زحمات جناب آقای مهندس چمی مسئول آزمایشگاه دانشکده مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد تشکر و قدردانی می‌کنم.

یک بر حسب  $\text{mm}^3/\text{N.m}$  را نشان می‌دهد. جدول (۶) نتایج داده‌های سایش در دمای بالا را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود کاهش وزن با افزایش مسافت لغزش افزایش می‌یابد. میزان کاهش وزن برای نمونه الکتروپولیش نسبت به نمونه ماسه پاشی شده بیشتر بوده است. سایش در فاصله لغزش بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر برای پوشش الکتروپولیش نیکل-فسفر با زیرلایه ماسه پاشی شده بدون تغییر وزن باقی مانده است. عدم تغییر وزن را می‌توان به علت دو مکانیزم متضاد با هم توصیف نمود اول، مکانیزم سایش که منجر به کاهش وزن پوشش شده و دوم، مکانیزم اکسیداسیون در دمای بالای آزمون که منجر به افزایش وزن می‌شود. در سطح پوشش در اثر سایش در دمای بالا و مسافت لغزش بالا لایه نازک اکسید ایجاد می‌شود. گزارش شده است که اصطکاک بین پین و سطح پوشش منجر به افزایش دما می‌شود و بنابراین دمای واقعی سطح مسیر سایش بالاتر از دمای اندازه‌گیری شده توسط دستگاه سایش است [۱۹]. همان‌طور که نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد، میزان اکسیداسیون سطح پوشش با زیرلایه الکتروپولیش شده نسبت به نمونه با زیرلایه ماسه پاشی شده کمتر است. در سطح پوشش به علت دمای بالای آزمون سایش یک لایه نازک اکسیدی ایجاد می‌شود. لایه نازک اکسید روی سطح پوشش در آزمون سایش در دمای بالا به عنوان روانکار عمل می‌کند [۱۹].

با افزایش زبری زیرلایه، چسبندگی بین پوشش و زیرلایه افزایش می‌یابد [۲۰]. افزایش چسبندگی به علت قفل مکانیکی ایجاد شده بین فصل مشترک پوشش و زیرلایه می‌باشد و منجر به افزایش مقاومت در برابر سایش می‌شود [۲۰]. نتایج مقاومت در برابر سایش داغ برای پوشش الکتروپولیش نیکل-فسفر نشان می‌دهد که با افزایش زبری زیرلایه مقاومت به سایش پوشش در دمای بالا افزایش می‌یابد. مطابق تصویر شکل (۴) سایش پوشش از نوع چسبان بوده و عرض مسیر سایش با علامت فلش مشخص شده است. نرخ سایش برای هر دو نوع زبری زیرلایه کاهش یافته است. کاهش میزان نرخ سایش برای پوشش الکتروپولیش با زیرلایه الکتروپولیش نسبت به پوشش الکتروپولیش با زیرلایه ماسه پاشی شده بیشتر می‌باشد.

## مراجع

۱۴. م. باطنی، الف. ساعتچی، "بررسی اثر پوشش‌های الکترولس نیکل بر رفتار خوردگی فولاد ۳۰۴ در محلول ۳/۵ درصد نمک طعام" مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی خوردگی، ۶۳۳-۶۴۲، ۱۳۷۴.
15. P. Ernst, "Porosity of Electroless Nickel Coatings Investigated Using Different Porosity Tests and Their Application"
  16. R. Taheri, "Evaluation of Electroless Nickel-Phosphorus (EN) Coatings" *University of Saskatchewan* (2002).
  17. A.M. Chowdhury, "The effect of frequency of vibration and humidity on the wear rate" *Wear*. 262 198-207 (2007).
  18. W. Sha, w. Sarililah, "Scanning electron microscopy study of microstructural evolution of electroless nickel-phosphorus deposits with heat treatment" *Materials Science and Engineering B*. 168 95-99 (2010).
  19. C.K. Chen, "The effect of heat treatment on the microstructure of electroless Ni-P coatings containing SiC particles" *Thin Solid Films*. 416 31-37 (2002).
  20. Y. Chow, W. Lau, "Surface properties and Solderability Behaviour of Nickel-phosphorus and Nickel-boron Deposited by Electroless Plating" *Surface and Interface Analysis*. 31321-327 (2001).
  1. D. Baudrand, "Electroless NiCkel plating" *Surface Engineering, ASM Handbook*, Vol. 5, pp. 290-310, 1992.
  2. S. Yuan Sheng, L. Zong-Ming, "The new technology and the partial thermotechnical computation for air-cooled blast furnace tuyere" *Applied Thermal Engineering*. 29 1232-1238 (2009).
  3. C. Ching Wen, "Numerical analysis for the multi-phase flow of pulverized coal injection inside blast furnace tuyere" *Applied Mathematical Modelling*. 29 871-884 (2005).
  4. P. Sahoo, S. K. Das, Tribology of electroless nickel coatings - A review, *Materials and Design*. 32 1760-1775 (2011).
  5. E. Norkus, "Obtaining of high surface roughness copper deposits by electroless plating technique" *Electrochimica Acta*, Vol. 51, pp.3495-3499, 2006.
  6. J. Henry, "Electroless Nickle: A metallic coating used for tooling protection" *Wear*. 90 723-730 (1988).
  7. N. Feldestin, "Electroless composite plating" *Guid book electroless*". 417-420 (1990).
  8. W.X. Zhang, J.G. He, Z.H. Jiang, "Electroless Ni-P layer with a chromium-free pretreatment on AZ91D magnesium alloy" *Surface & Coatings Technology*. 201 4594-4600 (2007).
  9. T. Dickinson, *Sheet metal Industrial*. 312 19 (1954).
  10. V.V.N. Reddy, B. Ramamoorthy, , "Study on the wear resistance of electroless Ni-P/diamond composite coatings", *Wear*. 239 111-116 (2000).
  11. W. Reidel, "Electroless Nickel Plating", *ASM international*, Metals Parks, Oh, 68-69, 1991.
  12. M. H. Staia, C. Enriquez, "Influence of the heat treatment on the abrasive wear resistance of electroless Ni-P" *Surface and Coatings Technology*. 91 513-548 (1997).
  13. F. Masoumi, H. R. Ghasemi, "Tribological characterization of electroless Ni-10% P coatings at elevated test temperature under dry conditions" *Advance Manufacture Technology*. 62 1063-1070 (2012).