تحليل ساختاري پوشش‌هاي الكترولس نيكل- فسفر عمليات پلاسمايي شده

كريم زنگنه مدار[1] و سيد محمود منيرواقفي[2]

۱- مجتمع مواد، دانشگاه صنعتي مالك اشتر تهران

۲- دانشكده مهندسي مواد، دانشگاه صنعتي اصفهان

چكيده

پوشش هاي الكترولس نيكل- فسفر در شرايط عمليات حرارتي شده، از سختي و مقاومت سايشي نسبتاً بالايي برخوردار مي باشند. عمليات حرارتي متداول اين پوشش ها (۱ ساعت در ۴۰۰^oC تحت اتمسفر خنثي) بيشتر موجب كريستاله شدن كامل آنها مي گردد. در تحقيق حاضر پوشش‌هاي نيكل- فسفر علاوه بر عمليات حرارتي متداول، تحت عمليات پلاسمايي نيز واقع شدند. ضخامت پوشش‌ها ۵ و ۱۰ ميكرون، دماي عمليات ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتيگراد و زمان آن ۱ و ۵ ساعت انتخاب شد. ضخامت، ساختار و تركيب پوشش‌ها در دو حالت عمليات حرارتي شده (HT) و عمليات پلاسمايي شده (PT) از طريق آزمون‌هاي متالوگرافي، XRD و EDS مورد مقايسه قرار گرفت. نتايج نشان داد كه ضخامت پوشش ها و نيز شدت و پهناي متوسط پيك‌هاي حاصل از تفرق فازها در دو نوع پوشش، متفاوت است. اين اختلاف‌ها به پديده كندوپاش، رفتار استحاله‌اي و كرنش داخلي متفاوت پوشش‌ها نسبت داده شد. همچنين مشخص شد كه تحت شرايط پلاسمايي، امكان كاهش فسفر و در نتيجه تغيير تركيب شيميايي پوشش وجود دارد.

واژه هاي كليدي: *پوشش هاي نيكل- فسفر، عمليات پلاسمايي، استحاله فازي، كندوپاش، شدت تفرق*

Structural evaluation of plasma treated electroless Ni-P coatings

K. Zangeneh[1] and S.M. Moonirvagefi[2]

1. Department of Materials Engineering, Malek-Ashtar University of Technology

2. Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract- Heat treated electroless Ni-P coatings have high hardness and wear resistance. Traditional heat treatment (1 hr at 400 ^oC under neutral atmosphere), results in full crystallization of electroless Ni-P coatings. In the present research, electroless Ni-P coatings were treated under conventional as well as plasma conditions. Coating thickness was 5 and 10 micron. Temperature rates and time of the processes were decided to be at 400 ^oC and 600 ^oC for 1 and 5 hours, respectively**.** Thickness, structure, and composition of the coatings were evaluated by optical microscopy, XRD and EDS methods in both heat treatment (HT) and plasma treatment (PT) conditions. It was shown that coating thickness as well as its XRD spectrum (i.e. intensity and breadth of peaks) was different. These disparities were related to sputtering phenomenon, special transformation behaviour, and residual strain in the plasma treated electroless Ni-P coatings. It was also found that chemical composition of the coatings could be altered during plasma process.

Keywords: Ni-P coating, Plasma treatment, Phase transformation, Sputtering, Diffraction intensity

مقدمه

متداول‌ترين روش بهبود خواص مكانيكي پوشش‌هاي نيكل- فسفر، عمليات حرارتي آنها مي‌باشد. طي سال‌هاي اخير به منظور توسعه فرآيندهاي تكميلي اين پوشش‌ها، از عمليات آنيل نفوذي [۱]، ليزر [۲،۳] و كاشت يوني [٤،٥] نيز استفاده شده است. فرآيندهايي نظير آنيل نفوذي و ليزر قادر به كريستاله كردن پوشش آمورف نيكل- فسفر و نيز نفوذ پوشش/زيرلايه در يكديگر مي‌باشند. عمليات كاشت يوني بدون ايجاد ناحيه نفوذي در فصل مشترك پوشش/زيرلايه، فقط باعث تغيير تركيب نواحي سطحي پوشش مي‌گردد.

علاوه بر فرآيندهاي فوق، از عمليات پلاسما نيز براي اصلاح خواص پوشش‌هاي نيكل- فسفر بهره گرفته شده است. بر اساس تحقيقات Wu و Li، عمليات قوس پلاسمايي باعث ذوب فصل مشترك و نفوذ متقابل پوشش/زيرلايه و بنابراين افزايش چسبندگي پوشش به زيرلايه شده و از طرفي سختي پوشش را با ايجاد فازهاي Ni_3P, Ni_5P_4 و Ni_7P_3 در آن، افزايش مي دهد [٦]. همچنين بر اساس بررسي‌هاي Wierzchon، Bielinski و Golanski، عمليات پلاسمايي پوشش‌هاي نيكل- فسفر در اتمسفر H_2/BCl_3 مي‌تواند سختي و مقاومت سايشي اين پوشش‌ها را تا حد زيادي افزايش دهد [۷،۸].

در تحقيق حاضر، پوشش‌هاي نيكل- فسفر تحت دو فرآيند عمليات حرارتي و عمليات پلاسمايي واقع شده و تحولات ساختاري در آنها مورد مقايسه قرار گرفته است. به منظور رعايت اختصار، اين فرآيندها در متن مقاله به صورت HT و PT بيان شده اند.

روش تحقيق

نمونه‌هايي از فولاد AISI۴۱۴۰ با تركيب ۰/۳%Mo-۰/۳۶%C-۰/۲۸%Si-۱/۱%Mn-۱/۵%Cr-۰/۴%Ni به قطر ۱۰mm و ضخامت ۳mm تهيه و پس از انجام عمليات ماسه پاشي، تميزكاري و آماده‌سازي سطح، بر روي آنها پوشش نيكل- فسفر اعمال شد. فرآيند پوشش‌دهي در حمام صنعتي الكترولس نيكل با دماي حدود ۹۰°C و pH حدود ٤/٦ به مدت‌هاي ۱۰ و ۲۵ دقيقه صورت گرفت. برخي نمونه‌هاي پوشش داده شده، تحت عمليات حرارتي و برخي ديگر تحت عمليات پلاسمايي قرار گرفتند. عمليات حرارتي در يك كوره آزمايشگاهي تحت اتمسفر آرگون و عمليات پلاسمايي در يك كوره نيمه صنعتي تحت اتمسفر نيتروژن/آرگون (به نسبت ۳/۱)، در دماهاي ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سانتيگراد و زمان هاي ۱ و ٥ ساعت تحت فشار ۵-۱ mbar انجام شدند. جدول ۱ كد نمونه ها را با توجه به ضخامت پوشش‌ها و شرايط عمليات نشان مي دهد.

براي تشخيص تغييرات ضخامت پوشش ها، از روش متالوگرافي با ميكروسكوپ نوري استفاده شد. همچنين براي تشخيص تحولات ساختاري و مقايسه الگوي تفرق پوشش‌ها، از دستگاه تفرق اشعه ايكس فيليپس مدل Pert-X'MPD با ولتاژ ٤۰ kV، جريان ۳۰ mA، سرعت روبش ۰/۱ s^{-1} و تشعشع Cu K_α (λ=۱/٥٤۲) استفاده گرديد. تركيب شيميايي پوشش‌ها نيز توسط سيستم EDS الحاقي به ميكروسكپ الكتروني روبشي فيليپس مدل XL۳۰ تعيين و با يكديگر مقايسه شد.

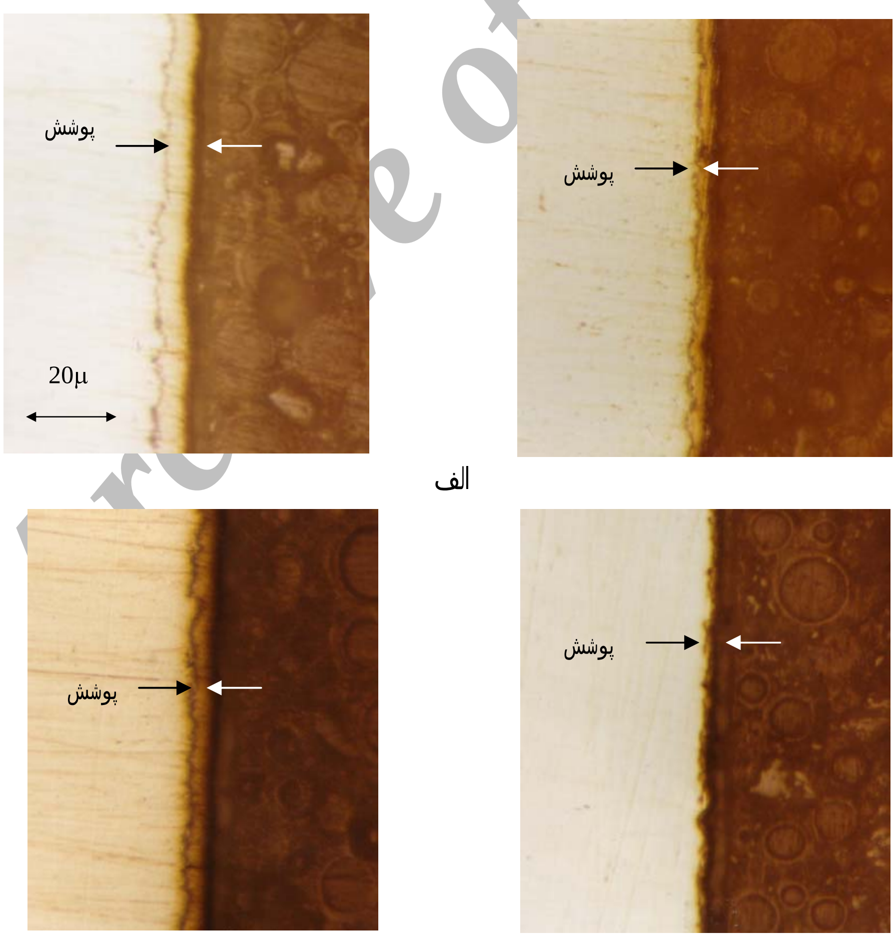
نتايج و بحث

تأثير عمليات پلاسمايي بر ضخامت پوشش ها

تصاوير ميكروسكوپ نوري مربوط به سطح مقطع پوشش-هاي ٥ و ۱۰ ميكرون عمليات حرارتي شده و عمليات پلاسمايي شده در دماي ٦۰۰ °C به مدت ٥ ساعت، در شكل ۱ مورد مقايسه قرار گرفته اند. با وجود فصل مشترك غير يكنواخت ناشي از ماسه پاشي سطح نمونه ها، كاهش نسبي ضخامت پوشش ها در اثر عمليات پلاسمايي به خوبي مشهود است. البته اين كاهش ضخامت در تمامي

جدول ۱: كد پوشش ها بر اساس ضخامت و شرايط عمليات آنها

كد پوشش ها	ضخامت پوشش (µm)	شرايط عمليات	
		درجه حرارت (°C)	زمان (hr)
۱/ ۴۰۰- ۵	۵	۴۰۰	۱
۵/ ۴۰۰- ۵			۵
۱/۶۰۰ - ۵		۶۰۰	۱
۵/ ۶۰۰- ۵			۵
۱/ ۴۰۰- ۱۰	۱۰	۴۰۰	۱
۵/ ۴۰۰- ۱۰			۵
۱/ ۶۰۰- ۱۰		۶۰۰	۱
۵/ ۶۰۰- ۱۰			۵



پوشش ۱۰ ميكرون — پوشش ۵ ميكرون

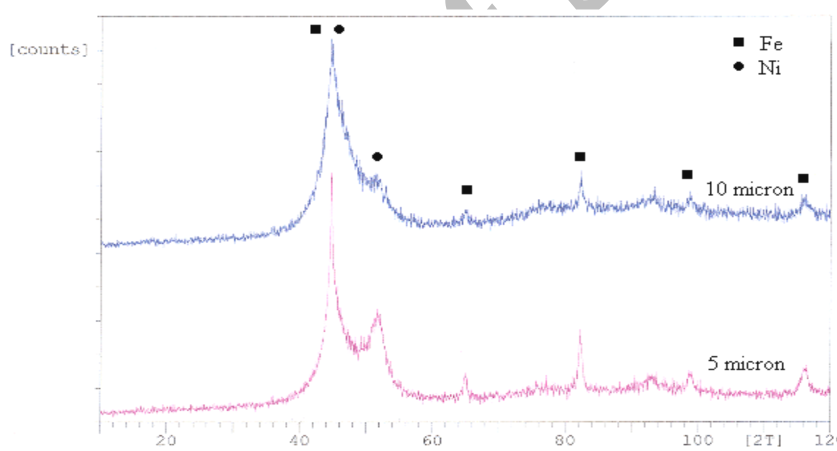
شكل ۱: تصاوير ميكروسكوپ نوري از سطح مقطع پوشش هاي نيكل- فسفر؛
الف) عمليات حرارتي شده ، ب) عمليات پلاسمايي شده .

سطح مقطع پوشش ها، يكنواخت نبوده و به همين علت نمي‌توان ميزان كاهش ضخامت آن ها را به طور دقيق تعيين نمود. بررسي سطح مقطع پوشش هاي عمليات شده در دماي $400\ ^oC$ تفاوت قابل توجهي را ميان پوشش‌هاي عمليات حرارتي و عمليات پلاسمايي شده، نشان نداده است.

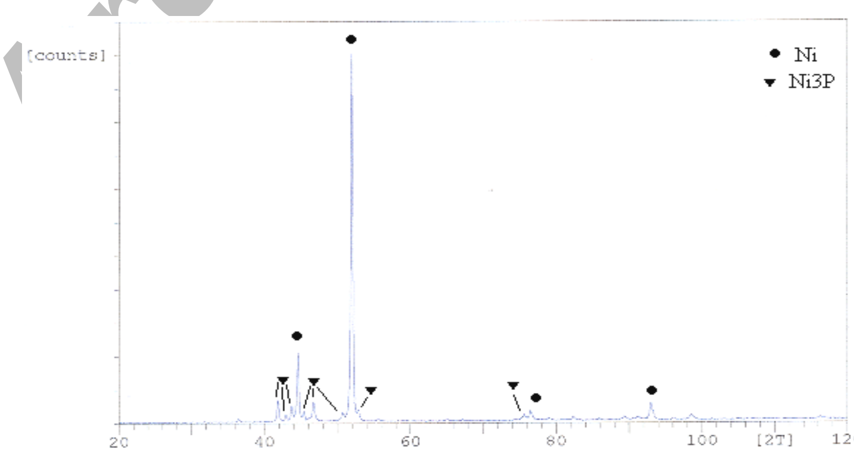
تأثير عمليات پلاسمايي بر شدت پيک هاي تفرق

شكل ۲ نتايج آناليز XRD پوشش ها را در دو حالت خام و عمليات شده نشان مي دهد. الگوي تفرق پوشش‌هاي خام (شكل ۲ الف) شباهت زيادي با الگوي تفرق پوشش‌هاي متوسط و پر فسفر، حاصل از نتايج Keong و همكارانش دارد. آنها معتقدند كه اينگونه الگوهاي تفرق، مربوط به پوشش‌هاي حاوي مخلوطي از ساختار نيكل آمورف و ميكروكريستالي مي باشند [۹].

به دليل ضخامت نسبتاً كم پوشش ها (۱۰-۵ ميكرون)، پيك‌هاي آهن زيرلايه نيز در نمودار تفرق پوشش‌هاي خام گشته اما با توجه به ضخامت كافي پوشش، هيچ گونه كاهشي در شدت كل پيك ها و شدت فاز نيكل مشاهده نمي شود. در نتيجه، افت شدت پيك هاي فاز Ni_3P ظاهر شده‌اند. در حالت عمليات شده، همه پوشش ها صرف نظر از نوع و شرايط عمليات، ساختاري متشكل از



الف



ب

شكل ۲: الگوي كلي تفرق اشعه حاصل از پوشش هاي نيكل-فسفر؛
الف) پوشش هاي خام، ب) پوشش هاي عمليات شده

جدول۲: مجموع شدت کل فازها، فازهاي نیکل و **Ni_3P** براي پوشش هاي عملیات حرارتي شده **(HT)** و عملیات پلاسمایي شده **(PT)** .

شدت پیک ها / کد پوشش ها	I_{Ni3P} HT	I_{Ni3P} PT	I_{Ni} HT	I_{Ni} PT	I_{total} HT	I_{total} PT
۵-۴۰۰/۱	۲۲۲۰	۲۲٤۳	۱۸۶۰۰	۱۹۰۷۰	۲۰۸۲۰	۲۱۳۱۳
۵-۴۰۰/۵	۲۵٤۱	۲۰۶۳	۲۷۸۱۸	۱۸۷۲۰	۳۰۳۷۷	۲۰۷۸۳
۵-۶۰۰/۱	٤۳٤۸	۲۵۱٤	۵۳۲٤۶	۲۱۶٤۱	۵۷۵۹۵	۲٤۱۵۵
۵-۶۰۰/۵	٤۷۸۷	۱۷۶٤	۳۲۳۸۹	۳۶٤۷	۳۷۱۷۶	۵٤۱۱
۱۰-۴۰۰/۱	۲۵۵۶	۲۵٤٤	۱۰۲۱۶	۱۱۱۶۹	۱۲۷۷۲	۱۳۷۱۳
۱۰-۴۰۰/۵	۲۹٤٤	۲۸۰۲	۱۰۰۸۵	۱۳۸۲۵	۱۳۰۲۹	۱۶۶۲۷
۱۰-۶۰۰/۱	٤۳۹۸	۳۲۶۱	۱۹۹۰٤	۲۶۳۶۰	۲٤۳۰۲	۲۹۶۲۱
۱۰-۶۰۰/۵	٤۳۰۵	۳۳۹۸	۲۵۹۱۶	۲۷۵۷۸	۳۰۲۲۱	۳۰۹۷۶

فازهاي نیکل کریستالي و Ni_3P از خود نشان مي دهند (شکل ۲ ب).

گرچه در حالت کلي، نمودارهاي تفرق مربوط به همه پوشش هاي عملیات شده تقریباً یکسان است لیکن بررسي دقیق تر آنها، تفاوت هایي را آشکار مي سازد. اطلاعات مربوط به شدت تفرق حاصل از پوشش‌هاي عملیات حرارتي شده (HT) در مقایسه با پوشش هاي عملیات پلاسمایي شده (PT)، براي دماها و زمان‌هاي مختلف عملیات، در جدول۲ آورده شده اند. این اطلاعات شامل مجموع شدت کل پیك ها (I_{total}) و مجموع شدت پیك‌هاي هر فاز مي‌باشد.

عملیات پلاسمایي پوشش ۵ میکرون به مدت۱ ساعت در دماي ۴۰۰^oC، در مقایسه با پوشش عملیات حرارتي شده، تغییر چنداني در شدت پیك ها ایجاد نکرده است (جدول۳) در حالي که انجام این عملیات به مدت ۵ ساعت در همان دما و یا دماي ۶۰۰^oC، افت قابل توجه شدت پیك ها (اعم از شدت کل و یا شدت هر فاز) را به دنبال داشته است. مقایسه شدت پیك ها براي پوشش ۵ میکرون به همراه نتایج متالوگرافي، مبین این واقعیت مي‌باشد که شرایط پلاسما (بمباران سطح توسط یون هاي گازي) بسته به درجه حرارت و زمان عملیات، موجب کندوپاش نسبي پوشش و در نتیجه، کاهش ضخامت آن مي‌گردد. این پدیده توسط سایر محققین نیز گزارش گردیده است [۱۰].

براي پوشش ۱۰ میکرون، نتایج متفاوتي حاصل شده است. عملیات پلاسمایي، سبب افزایش قابل ملاحظه شدت فاز نیکل و کاهش نسبي شدت فاز Ni_3P گشته به نحوي که شدت کل پیك ها، نسبت به پوشش عملیات حرارتي شده، نه تنها کاهش نیافته (بر خلاف پوشش ۵ میکرون) بلکه نوعي افزایش هم نشان مي دهد. قاعدتاً در این حالت نیز (مشابه آنچه که براي پوشش ۵ میکرون اشاره شد) اتمسفر پلاسما باعث کندوپاش نسبي پوشش درپوشش ۱۰ میکرون وبنابراین کاهش درصد این فاز در پوشش هاي عملیات پلاسمایي شده، در مقایسه با پوشش‌هاي عملیات حرارتي شده، نمي‌تواند به کندوپاش پوشش مربوط باشد و باید علت آن را در جاي دیگري جستجو نمود.

تأثیر عملیات پلاسمایي بر ترکیب شیمیایي پوشش‌ها

به منظور رفع ابهام فوق و همچنین اطمینان از صحت

جدول۳: ميزان تغيير در شدت فازها در پوشش هاي عمليات پلاسمايي شده نسبت به پوشش هاي عمليات حرارتي شده **(HT)**

کد پوشش ها	$\Delta I_{Ni3P}/I^{HT}_{Ni3P}$ (%)	$\Delta I_{Ni}/I^{HT}_{Ni}$ (%)	$\Delta I_t/I^{HT}_t$ (%)
۵-۴۰۰/۱	۱	۲/۵	۲/۵
۵-۴۰۰/۵	-۱۸/۸	-۳۲/۷	-۳۲
۵-۶۰۰/۱	-٤۲/۲	-۵۹/۳	-۵۸
۵-۶۰۰/۵	-٦۳/۲	-۸۸/۷	-۸۵
۱۰-۴۰۰/۱	-۰/۵	۹/۳	۷/٤
۱۰-۴۰۰/۵	-٤/۸	۳۷/۱	۲۷/٦
۱۰-۶۰۰/۱	-۲۵/۹	۳۲/٤	۲۱/۹
۱۰-۶۰۰/۵	-۲۱	٦/٤	۲/۵

اطلاعات حاصل از نتايج XRD و نيز جهت تعيين تركيب شيميايي پوشش هاي نيكل- فسفر، از آناليز EDS بهره گرفته شد. بر اساس نتايج EDS مربوط به پوشش هاي با ضخامت ۱۰ ميكرون، كه در جدول٤ آورده شده، ميزان فسفر اوليه پوشش‌ها كه حدود ۱۴-۱۰% بوده، گرچه در اثر عمليات حرارتي تغيير چنداني نكرده ليكن در اثر واقع شدن تحت اتمسفر پلاسما، به ۱۱-۹% كاهش يافته است به دليل نازك شدن بيش از حد پوشش ۵ ميكرون در اثر پديده كندوپاش و بروز اثرات زيرلايه در نتايج، از اطلاعات آناليز EDS اين پوشش ها استفاده نشده است).

به نظر مي رسد كاهش ميزان فسفر پوشش در همان مراحل اوليه عمليات پلاسمايي صورت گرفته باشد كه علت آن را مي توان به فشار بخار بالاي فسفر و همچنين سهولت كندوپاش آن نسبت به خود پوشش (نيكل) نسبت داد. بر اساس نتايج مطالعات، انرژي لازم براي كندوپاش اتم هاي يک عنصر به عدد اتمي (يا جرم اتمي) و نيز به گرماي تصعيد آن بستگي داشته و معمولاً با كاهش عدد اتمي و گرماي تصعيد، كاهش مي يابد [۱۱]. با توجه به اينكه انرژي لازم براي كندوپاش عنصر فسفر كمتر از نيكل بوده [۱۲] و از طرفي، گرماي تصعيد فسفر ($kJ.mole^{-1}$ ۱۰۰) نيز كمتر از گرماي تصعيد نيكل ($kJ.mole^{-1}$ ۴۳۰) مي باشد، چنين انتظار مي رود كه فسفر پوشش سريع تر از خود پوشش (نيكل) دچار كندوپاش شده و از پوشش خارج گردد.

مقايسه شدت پيک ها و تركيب پوشش ها

چنانچه مقادير درصد كاهش شدت فاز Ni_3P پوشش (حاصل از نتايج XRD در جدول ۳ براي پوشش ۱۰ ميكرون) و مقادير درصد كاهش ميزان فسفر پوشش (حاصل از نتايج EDS در جدول٤ براي پوشش ۱۰ ميكرون) با يكديگر مقايسه شوند، نتايج جالبي حاصل خواهد شد. تحت عمليات پلاسمايي، متوسط مقادير كاهش درصد شدت فاز Ni_3P و كاهش درصد فسفر پوشش به ترتيب حدود ۱۳% و ۱۷% مي باشد. با توجه به ضريب استوكيومتري فسفر در فاز Ni_3P، قاعدتاً هرگونه كاهشي در ميزان فسفر پوشش، بايستي موجب كاهش فاز Ni_3P به همان ميزان در پوشش شود. بنابراين مي توان اظهار داشت كه عمليات پلاسمايي پوشش‌هاي نيكل-

جدول٤: مقايسه درصد وزني فسفر، حاصل از نتايج **EDS**

براي پوشش هاي ۱۰ ميكرون عمليات حرارتي شده **(HT)** و عمليات پلاسمايي شده **(PT)** .

كد پوشش ها	درصد فسفر پوشش ها (۱%±) HT	PT	درصد كاهش ميزان فسفر (۱%±) در پوشش هاي PT نسبت به HT
۱۰-۴۰۰-۱/	۱۰/۲	۹/۹	۳
۱۰-۴۰۰-۵/	۱۳/۱	۱۰	۲٤
۱۰-۶۰۰-۱/	۱۲/۳	۹/۹	۲۰
۱۰-۶۰۰-۵/	۱۱/٦	۹/۲	۲۱

فسفر (به ضخامت ۱۰ ميكرون) در مقايسه با عمليات حرارتي متداول، باعث كاهش ميزان فسفر (يا درصد فاز Ni_3P) آنها به ميزان حدود ۱۵% مي گردد.

مراجعه مجدد به مندرجات جدول۳ نشان مي دهد كه مجموع شدت پيك هاي فاز نيكل در پوشش هاي ۱۰ميكرون عمليات پلاسمايي شده، نسبت به پوشش هاي عمليات حرارتي شده، به طور متوسط حدود ۲۰% بيشتر است. اين موضوع مي تواند ناشي از تفاوت ميزان كريستاله شدن نيكل آمورف در حين دو عمليات فوق باشد.

اصولاً تحولات ساختاري پوشش هاي نيكل-فسفر در حين عمليات حرارتي شامل دو مرحله مي باشد: تبديل نيكل آمورف به كريستالي و تشكيل فازهاي فسفيد نيكل. بسياري از محققين معتقدند كه مراحل فوق به طور هم زمان رخ مي دهند، بدين معني كه همراه با كريستاله شدن نيكل، ذرات فسفيد نيكل نيز ايجاد مي‌گردند. بر اساس نظر ساير محققين، در حين عمليات حرارتي پوشش هاي نيكل- فسفر، ابتدا كريستاله شدن نيكل به وقوع پيوسته و پس از مدتي، فازهاي فسفيد نيكل ايجاد مي شوند [۹،۱۳،۱٤]. چنين استنباط مي‌شود كه عمليات پلاسمايي پوشش هاي نيكل- فسفر در تحقيق حاضر، بدون آنكه تأثير زيادي بر سرعت تشكيل فاز Ni_3P داشته باشد، سبب تسريع در استحاله آمورف به كريستالي شده باشد.

جدول ۵ كاهش ميزان فاز Ni_3P در پوشش هاي عمليات پلاسمايي شده را در مقايسه با پوشش هاي عمليات حرارتي شده، بر اساس نتايج XRD نشان مي‌دهد. چنانچه در سطور قبل (با توجه به مقايسه نتايج XRD و EDS) اشاره شد، عمليات پلاسمايي مي تواند منجر به كاهش ميزان فاز Ni_3P در پوشش به ميزان حدود ۱۵% (از طريق كاهش ميزان فسفر) گردد. اما اطلاعات مندرج در جدول ۵ مقادير كاهش بيشتري را در ميزان فاز Ni_3P (به طور متوسط ۲۵%) نشان مي دهند. اين كاهش اضافي در ميزان Ni_3P پوشش هاي عمليات پلاسمايي شده را مي توان به تسريع در ايجاد نيكل كريستالي از پوشش نسبت داد.

تأثير عمليات پلاسمايي بر عرض متوسط پيك‌هاي تفرق

ساير اطلاعات حاصل از نتايج آناليز XRD، شامل ميانگين مجموع عرض كل پيك هاي مربوط به هر پوشش (Average Breadth) در جدول ٦ آورده شده است. پهناي متوسط پيك ها براي پوشش هاي عمليات پلاسمايي شده، حدود ۰/۰۹-۰/۰۱ درجه بيشتر از پوشش هاي عمليات حرارتي شده مي باشد. بررسي نتايج تفرق چندين نمونه كاملاً يكسان در تحقيق حاضر نشان داده كه انحراف معيار عرض متوسط كل پيك ها (σ) حدود ۰/۰۱± درجه مي باشد. با توجه به اينكه محدوده اختلاف مقادير پهناي پيك ها، فراتر از حد انحراف معيار مي باشد، تفاوت عرض

جدول۵: مقايسه درصد فاز Ni_3P (محاسبه شده از نسبت شدت پيك ها در نتايج **XRD**)
براي پوشش هاي ۱۰ ميكرون عمليات حرارتي شده **(HT)** و عمليات پلاسمايي شده **(PT)** .

كد پوشش ها	%Ni_3P پوشش‌ها		درصد كاهش فاز Ni_3P در پوشش هاي PT نسبت به HT
	HT	PT	
۱۰ -۴۰۰ /۱	۲۰	۱۸/۵	۷/۵
۱۰ -۴۰۰ /۵	۲۲/٦	١٦/۸	۲۵/۷
۱۰ -۶۰۰ /۱	۱۸/۱	۱۱	۳۹/۲
۱۰ -۶۰۰ /۵	١٤/۲	۱۱	۲۲/۵

پيك‌ها در نمودارهاي تفرق را مي توان به دو عامل، اندازه دانه‌هاي نيكل كريستالي و كرنش داخلي پوشش‌ها، نسبت داد. بر اساس رابطه زير [۱۳]:

$$B = [(4e.tg\ \theta)^2 + (\lambda/d.Cos\ \theta)^2]^{1/2}$$

كه در آن B پهناي پيك، e كرنش داخلي پوشش، d اندازه دانه نيكل، θ زاويه تفرق و λ طول موج اشعه مي‌باشد، افزايش كرنش و يا كاهش اندازه دانه، سبب عريض‌تر شدن پيك‌هاي حاصل از تفرق مي‌گردد.

بر اساس آنچه كه قبلاً راجع به تأثير شرايط عمليات پلاسمايي بر استحاله آمورف به كريستالي ذكر شد، تحت زمان يكسان عمليات، قاعدتاً بايستي اندازه دانه هاي نيكل در پوشش پلاسما شده، نسبت به پوشش عمليات حرارتي شده، بزرگتر و يا هم اندازه باشد (به هرحال كوچكتر نخواهد بود). در نتيجه، پهن تر بودن پيك ها در پوشش هاي پلاسما شده، بيشتر ناشي از وجود تنش يا كرنش داخلي بالاتر در آنها مي باشد. البته تشخيص اينكه تنش داخلي در اين پوشش ها از نوع كششي و يا فشاري باشد مشكل است ولي به دليل ماهيت شرايط پلاسما (بمباران سطح توسط يون هاي پر انرژي) و نيز امكان نفوذ نيتروژن موجود در اتمسفر پلاسما به درون پوشش، انتظار مي رود كه اين تنش‌ها از نوع فشاري باشند.

نتيجه‌گيري

با ارزيابي ساختار و تحليل كمي و كيفي فازهاي موجود در پوشش‌هاي نيكل- فسفر عمليات حرارتي شـده تحـت دو شرايط معمولي و پلاسمايي، نتايج زير بدست آمد:

۱- عمليات پلاسمايي سبب كندوپاش پوشش نيكل- فسفر مي گردد. ميزان اين كندوپاش در دمـاي ۶۰۰°C بـيش از دماي ۴۰۰°C مي باشد.

۲- اتمسفر پلاسما باعث كاهش ميزان فسفر پوشش گـشته و بنابراين درصد فاز Ni_3P ايجـاد شـده در پوشـش را (حدود ۱۵%) كاهش مي دهد.

۳- تحت عمليات پلاسمايي، استحاله آمورف به كريـستالي در پوشش هـاي نيكـل- فـسفر، مـي‌توانـد بـا سـرعت بيشتري انجام پذيرد.

٤- با توجه به عريض‌تر بودن پيك‌هاي حاصل از تفرق در پوشش‌هاي پلاسما شده، عمليات پلاسمايي موجب القاي تنش پسماند فشاري در پوشش ها مي گردد.

تشكر و قدرداني

نويسندگان مقاله مراتب امتنان خويش را از مسئولين مركز پژوهش مهندسی سطح ايران، شهرك علمي-تحقيقاتي اصفهان و آزمايشگاه SEM و XRD دانشكده مواد دانشگاه صنعتي اصفهان، آقايان مهندس دهاقين، مهندس صفريان و سركار خانم مهندس صرامي ابراز مي‌دارند.

جدول٦: مقايسه متوسط مجموع عرض پيك ها (**$B_{average}$**) براي پوشش‌هاي عمليات حرارتي شده (**HT**) و عمليات پلاسمايي شده (**PT**) .

ΔB	$B_{average}$		كد پوشش ها	ΔB	$B_{average}$		كد پوشش ها
	PT	HT			PT	HT	
۰	۰/۳۳	۰/۳۳	۱۰ -۴۰۰ /۱	۰/۰۲	۰/۲۹	۰/۲۷	۵ -۴۰۰ /۱
۰/۰۱	۰/۲۸	۰/۲۷	۱۰ -۴۰۰ /۵	۰/۰٤	۰/۲٦	۰/۲۲	۵ -۴۰۰ /۵
۰/۰۳	۰/۲۷	۰/۲٤	۱۰ -۶۰۰ /۱	۰/۰۷	۰/۲۸	۰/۲۱	۵ - ۶۰۰/۱
۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۲	۱۰ -۶۰۰ /۵	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۲٤	۵ -۶۰۰ /۵

مراجع

1. K. L. Lin and W. C. Chen, *The Interdiffusion and Interphases Formed Between Electroless Nickel Deposit and Steel Substrate*, Scrip. Metall. Mater, 29(5)(1993)667-672.
2. A. Hugon, *Modification of the Properties of Electroless Nickel-Phosphorus Coatings by Laser Annealing or Melting*, The Min. Met. Mater. Soc.,(1989)71-81.
3. L. Renaud, *Surface Alloys Obtained on Mild Steel by Laser Treatment of Electroless Nickel Coatings*, Acta Metall. Mater., 38,(8)(1990)1547-1553.
4. K. Hanamoto, *Annealing Effects on the Hardening of Electroless Plated Ni-P Layer by Boron Implantation*, Nuc. Instru. Meth. Phy. Res., B145(1998)391-394.
5. J. I. Onate, *Nitrogen Implantation of Tool Steels and Engineering Coatings*, Dissertation Abstracts International, 51(4)(1990)310.
6. Y. Wu and H. Li, *Solute Distribution and Phase Structure of Electroless Ni-P Alloy Layer by Plasma Remelting*, Trans. Mater. Heat Treat. (China), 22(2)(2001)19-22.
7. T. Wierzchon and P. Bielinski, *Formation and Properties of Multicomponent and Composite Borided Layers on Steel*, Sur. Coat. Tech,73(1995)121-124.
8. D. Golanski, *Numerical Modeling of Residual Stresses in Boride Layers on Steel*, Sur. Eng., (2)(1997)145-148.
9. K. G. Keong, W. Sha and S. Malinov, *Hardness Evaluation of Electroless Nickel-Phosphorus Deposits With Thermal Processing*, Sur. Coat. Tech., (2003)263-274.
10. F. B. Wu, Y. I. Chen and P. J. Peng, *Fabrication, Thermal Stability and Microhardness of Sputtered Ni–P–W Coating*, Sur. Coat. Tech., (2002)232-238.
11. J. L. Vossen and W. Kern, *Thin Film Processes*, Academic Press, (1978)513.
12. L. I. Maissel and R. Glang, *Handbook of Thin Film Technology*, McGraw-Hill Pub,(1970)3-23.
13. Z. Guo, K. G. Keong and W. Sha, *Crystallisation and Phase Transformation Behaviour of Electroless Nickel Phosphorus Platings During Continuous Heating*, J. Alloys Comp,358(2003)112-119.
14. D. T. Gawne and U. Ma, *Structure and Wear Electroless Nickel Coatings*, Mater. Sci. Tech, 3(1987)228-238.