

بررسی خواص پوشش الکترولس Ni-B نیتروژن دهی پلاسمایی شده به دو روش متداول و توری فعال

دنیا احمدخانی ها و فرزاد محبوبی

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران

(دریافت مقاله : ۸۸/۱۱/۶ - پذیرش مقاله : ۸۹/۴/۱۳)

چکیده

این تحقیق، تلاشی است برای بررسی تأثیر نیتروژن دهی پلاسمایی بر خواص پوشش الکترولس Ni-B. به این منظور پوشش الکترولس با استفاده از حمام بوروهیدریدی بر روی فولاد AISI ۴۱۴۰ اعمال شد. پوشش ها در دماهای ۴۵۰ و ۵۰۰°C تحت عملیات حرارتی آنیل در اتمسفر کنترل شده و نیتروژن دهی پلاسمایی به دو روش متداول و توری فعال قرار گرفته و تأثیر این عملیات بر خواص سطحی پوشش با هم مقایسه شد. ساختار، زبری سطح، ریزسختی و مقاومت سایشی پوشش ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که ساختار آمورف پوشش الکترولس Ni-B در اثر هر دو عملیات حرارتی آنیل و نیتروژن دهی پلاسمایی به فازهای نیکل بلوری و بورید نیکل (Ni₂B و Ni₃B) تبدیل شده، سختی پوشش افزایش و نرخ سایش کاهش می یابد. نیتروژن دهی پلاسمایی نسبت به عملیات حرارتی آنیل با وجود افزایش زبری سطح به دلیل افزایش بیش تر سختی، باعث بهبود مقاومت سایشی می شود. نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال نسبت به عملیات حرارتی آنیل و نیتروژن دهی پلاسمایی به روش متداول، زبری سطح پوشش را کاهش داده و خواص سایشی بهتری ایجاد می کند.

واژه های کلیدی: الکترولس Ni-B، نیتروژن دهی پلاسمایی، نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال، مقاومت سایشی.

Evaluation of the properties of nitrated electroless Ni-B coating by conventional and active screen plasma nitriding

D. Ahmadkhaniha and F. Mahboubi

Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran

Abstract

This project was an attempt to evaluate the effect of plasma nitriding on properties of electroless Ni-B coatings. For this purpose electroless Ni-B coatings were deposited from an alkaline bath on 4140 AISI substrate. Then, coatings were annealed under controlled atmosphere and plasma nitrated by two methods (conventional and active screen) at 450 and 500°C temperatures. Microstructure, surface roughness, microhardness and wear resistance of the coatings were examined. Results showed that amorphous Ni-B coatings changed to crystalline nickel and nickel borides by annealing and plasma nitriding, microhardness increases and wear rate decreased. Although plasma nitriding increased surface roughness more than annealing, but it improved wear resistance due to increase in the microhardness of the coatings. It was also found that the active screen plasma nitriding in comparison to annealing and conventional plasma nitriding decreased the surface roughness and improved wear resistance.

Keywords: Electroless Ni-B, Plasma Nitriding, Active screen Plasma Nitriding, Wear Resistance.

E-mail of corresponding author: donya_ahmadkhany@yahoo.com

مقدمه

پلاسمایی است، به همین علت در این تحقیق از روش نیتروژن دهی پلاسمایی برای عملیات این پوشش ها استفاده شده است. هدف از این تحقیق بررسی اثر نیتروژن دهی پلاسمایی به هر دو روش متداول و توری فعال بر سختی و خواص سایشی پوشش الکترولس نیکل-بور می باشد.

موارد و روش ها

نمونه های فولادی AISI ۴۱۴۰ با قطر ۲۰ mm و ارتفاع ۷ mm سنباده زنی شده سپس با استون شسته شدند. ترکیب شیمیایی فولاد که توسط کوانتومتری تعیین شده، در جدول ۱ آورده شده است. نمونه ها در محلول حاوی ۲۰ g/l سود و ۱۰ g/l بی کربنات سدیم چربی گیری و سپس در اسیدسولفوریک ۱۰٪ اسیدشویی شدند. به منظور پوشش دهی نمونه ها در حمام الکترولس که ترکیب آن در جدول ۲ ذکر شده به مدت یک ساعت در دمای $90 \pm 2^\circ\text{C}$ قرار گرفتند. برای بهبود خواص پوشش ها، تعدادی از نمونه ها تحت عملیات حرارتی آنیل در اتمسفر کنترل شده به مدت یک ساعت و باقی مانده نمونه ها تحت عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی به دو روش متداول و توری فعال به مدت پنج ساعت در اتمسفر حاوی $0.75\text{ N}_2 + 0.25\text{ H}_2$ قرار گرفتند. دمای عملیات ۴۵۰ و 500°C بود. برای بررسی فازهای تشکیل شده از پراش اشعه X استفاده شد. بررسی مورفولوژی پوشش و سطح سایش به کمک SEM و WDS صورت گرفت و سختی نمونه ها با دستگاه ریزسختی سنچ ویکرز با بار ۲۵ g به مدت ۱۵ ثانیه اندازه گیری شد. مقاومت به سایش پوشش ها توسط دستگاه پین بر روی دیسک با پین DIN 1.3505 تحت بار ۲ نیوتن، سرعت ۰/۱m/s و مسافت سایش ۱۰۰۰ متر (بدون استفاده از روان کار) بررسی گردید. نمونه ها قبل و بعد از آزمایش سایش با ترازو به دقت ۰/۱ میلی گرم وزن شدند تا کاهش وزن در اثر سایش اندازه گیری شود.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد AISI ۴۱۴۰ بر حسب درصد وزنی

C	Ni	Cr	Mo	Si	S	P
۰/۳۶	۰/۲۱	۰/۹۶	۰/۲	۰/۲۲	۰/۰۱	۰/۰۲

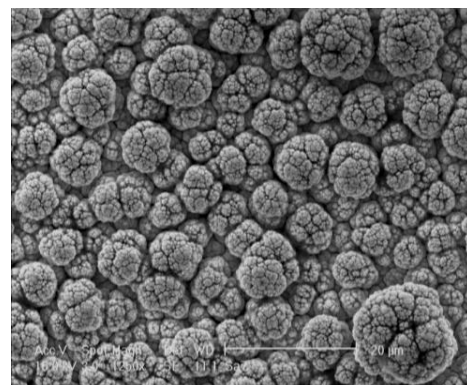
پوشش الکترولس نیکل به دلیل سختی، مقاومت به سایش بالا و یک نواختی ضخامت در صنایع مختلف مانند پتروشیمی، هوافضا، هسته‌ای، خودروسازی، الکترونیک و غیره کاربرد زیادی دارد [۲ و ۱]. پوشش های الکترولس نیکل-فسفر و نیکل-بور از جمله معروف ترین این پوشش ها هستند. برای پوشش دهی الکترولس نیکل از عامل های کاهنده ای مانند آمینوبران، هیپوفسفیته، بوروهیدرید، هیدرازین و ... می توان استفاده کرد اما از بین این عامل های کاهنده، بوروهیدرید سدیم به دلیل بازدهی بالاتر و قیمت مناسب تر آن ارجحیت دارد [۴ و ۳]. این پوشش ها دارای ساختار آمورف هستند و با افزایش مقدار بور درصد فاز آمورف هم افزایش می یابد [۱-۶]. خواص این پوشش ها به ترکیب شیمیایی حمام و عملیات حرارتی آن ها بستگی دارد. تا کنون روش های مختلفی برای عملیات حرارتی این پوشش ها در نظر گرفته شده است [۲-۹]. P. Lienard و F. Delaunois برای بهبود خواص این پوشش ها، آن ها را تحت عملیات آنیل قرار دادند [۴ و ۶]. بر اساس تحقیقات Derovos و همکارانش، عملیات حرارتی تحت خلأ سختی این پوشش را نسبت به عملیات حرارتی آنیل بیش تر افزایش می دهد [۱۰]. زنگنه و منیر واقفی با کمک نیتروژن دهی گازی باعث بهبود خواص سایشی و سختی شدند [۱۱]. هم چنین آن ها به تحلیل ساختاری پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده پرداختند [۱۲]. نیتروژن دهی پلاسمایی از جمله عملیات سطحی است که باعث افزایش سختی، مقاومت سایشی و خوردگی و استحکام خستگی می شود. اما از آن جا که در روش نیتروژن دهی پلاسمایی به روش متداول مشکلاتی از قبیل اثر لبه و هالو کاتد وجود دارد، روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال برای غلبه بر این مشکلات توسعه پیدا کرده است [۱۳ و ۱۴]. محدوده دمای عملیات حرارتی پوشش های الکترولس در محدوده دمای عملیات نیتروژن دهی

جدول ۲. ترکیب حمام الکترولس نیکل - بور

ترکیب حمام	کلرید نیکل	هیدروکسید سدیم	استات تالیم	بورو هیدرید سدیم	اتیلن دی آمین
غلظت (g/l)	۲۰-۳۵	۳۰-۹۰	۰/۰۱۲-۰/۰۲۵	۰/۵-۱/۲	۸۰-۹۰

نتایج و بحث

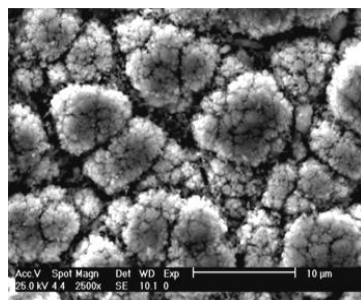
همان طور که در شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده می شود، مورفولوژی این پوشش ها گل کلمی است و این مورفولوژی باعث می شود که این پوشش ها به طور طبیعی روان کار باشند. روان کار در بین فرورفتگی های گل کلمی شکل باقی مانده و باعث بهبود مقاومت سایشی می شود.



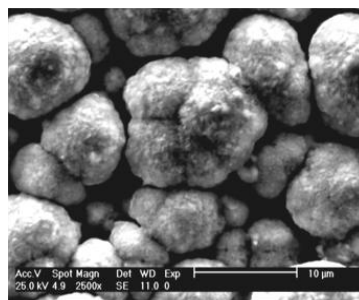
شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی پوشش الکترولس نیکل - بور.

در شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به پوشش آنیل شده و نیتروژن دهی پلاسمایی شده به هر دو روش متداول و توری فعال آورده شده است. نیتروژن دهی پلاسمایی به دلیل پدیده کندوپاش زبری سطح (R_a) را افزایش می دهد. با افزایش دما نیز به دلیل درشت شدن گل

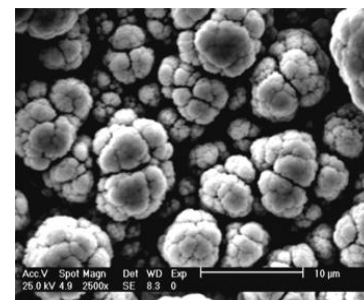
کلم ها، زبری سطح افزایش می یابد (تحت عملیات حرارتی آنیل، زبری سطح از ۱/۳ میکرومتر در دمای 450°C به $1/42$ میکرومتر در دمای 500°C افزایش می یابد). در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول، با افزایش دمای عملیات علاوه بر درشت شدن توده های گل کلمی، شدت کندوپاش نیز افزایش یافته و زبری سطح بیش تری نسبت به عملیات ساختار پوشش الکترولس Ni-B بستگی به مقدار بور دارد. در صورتی که مقدار بور به اندازه کافی باشد، پوشش دارای ساختار آمورف است. نمودار XRD در شکل ۴ پیک پهنی را نشان می دهد که معرف ساختار آمورف پوشش است. از نظر تئوری هر بی نظمی در آرایش اتمی به صورت پیک پهنی در نمودار XRD نشان داده می شود. همان طور که در نمودار XRD نشان داده شده است، ساختار این پوشش ها توسط عملیات حرارتی آنیل و نیتروژن دهی پلاسمایی بلوری شده و رسوبات بورید نیکل (Ni_2B و Ni_3B) حاصل می شود. فازهای تشکیل شده توسط هر دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی (متداول و توری فعال) مشابه بوده و فرقی با هم ندارند. از آن جا که در پوشش دهی الکترولس Ni-B از استات تالیم به عنوان عامل پایدار کننده استفاده شده، طبق رابطه های ۱ تا ۳ تالیم وارد پوشش می شود. به همین علت در نمودار های XRD فاز تالیم هم مشاهده شده است.



(ج)

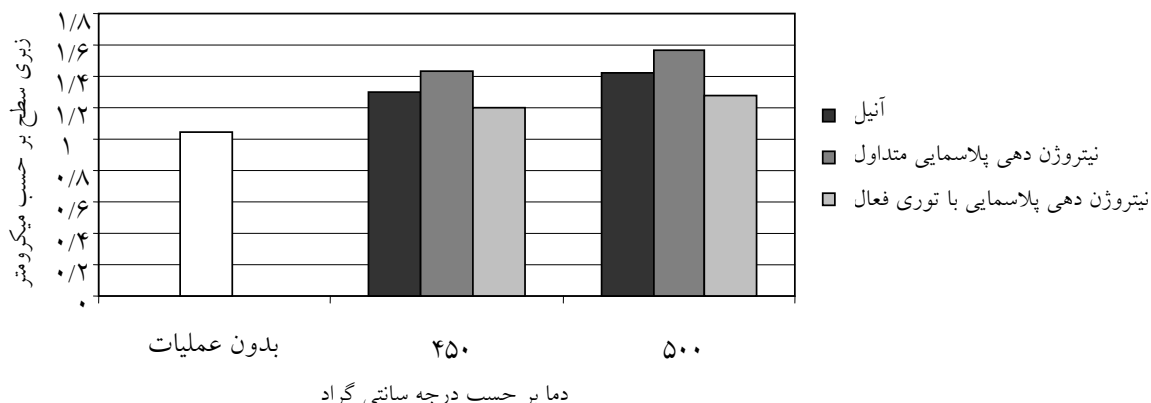


(ب)



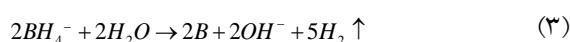
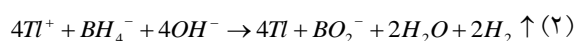
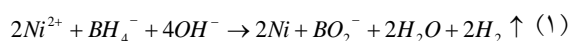
(الف)

شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به پوشش الکترولس نیکل - بور (الف) آنیل شده، (ب) نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول، (ج) نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال.

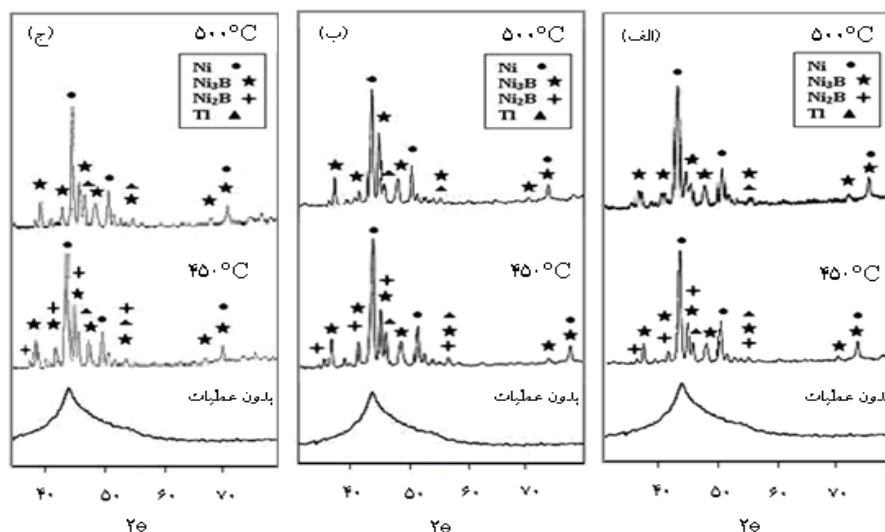


شکل ۳. نمودار زبری سنجی پوشش الکترولس نیکل - بور بر حسب دما.

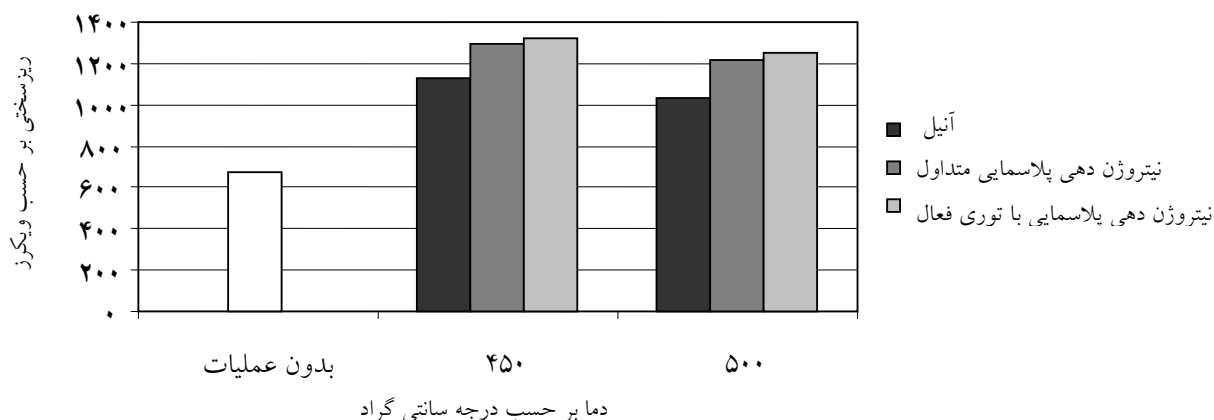
می باشد. علت افزایش سختی پوشش های الکترولس نیتروژن دهی پلاسمایی شده را می توان به دلیل قرار گرفتن نیتروژن به صورت عنصر بین نشین در این پوشش ها بیان کرد. هم چنین با بررسی شدت پیک های Ni_3B/Ni در نمودارهای XRD مشاهده شد که شدت پیک های Ni_3B/Ni در پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال از همه بیش تر و برای پوشش آنیل شده از همه کم تر است. از آن جا که فازهای Ni_3B ، فازهای سختی هستند، بنابراین با افزایش شدت این فازها در پوشش، سختی پوشش افزایش می یابد. ریزسختی پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال در محدوده ریزسختی پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول است.



ریزسختی پوشش الکترولس Ni-B در هر دو شرایط اندازه گیری شده و نتایج در شکل ۵ آمده است. افزایش سختی به دلیل تشکیل رسوبات بورید نیکل (Ni_3B و Ni_2B) می باشد که حضورشان در نمودارهای XRD مشاهده می شود. با افزایش دمای عملیات به دلیل درشت شدن رسوبات و تجمع شان، سختی کاهش می یابد [۳ و ۹]. ریزسختی پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده بیش تر از پوشش های آنیل شده



شکل ۴. نمودار XRD پوشش الکترولس نیکل - بور (الف) آنیل شده، (ب) نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول، (ج) نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال.



شکل ۵. نمودار ریزسختی پوشش الکترولس نیکل - بور بر حسب دما.

ویکرز است. با توجه به نتایج ذکر شده در بالا به نظر می رسد که نفوذ نیتروژن کاهش سختی در اثر تمپیر شدن را جبران کرده است. با توجه به این که خواص زیرلایه در مقاومت سایشی پوشش ها موثر است و پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده، زیرلایه نسبتاً سخت تری دارند، مقاومت سایشی این پوشش ها بهتر از پوشش های آنیل شده می باشد. مقاومت سایشی پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال از بقیه شرایط بهتر است. با این که سختی پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال در محدوده سختی پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول می باشد، اما به دلیل زبری سطح کم تر این پوشش ها و یک نواختی بیش تر، مقاومت سایشی بهتری از پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول از خود نشان می دهند.

با بررسی سطوح سایش مشاهده شد که سطح سایش در پوشش بدون عملیات در قسمت هایی کنده شده است. کندگی پوشش بیان گر سایش چسبان است. از آن جا که نیکل و آهن حلالیت بالایی در هم دارند، سایش چسبان برای این پوشش ها قابل توجه است. اما در پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده به دلیل افزایش سختی و هم چنین به دلیل حلالیت کم بورید نیکل و آهن، کندگی پوشش کاهش یافته است.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، عرض شیار سایش پوشش الکترولس نیکل - بور با افزایش مقاومت سایشی کاهش یافته است. نازک ترین شیار سایش مربوط به

نتایج مقاومت سایشی پوشش الکترولس در هر دو شرایط عملیات حرارتی آنیل و نیتروژن دهی پلاسمایی توسط دستگاه پین بر روی دیسک تحت بار ۲ نیوتن محاسبه و نتایج حاصله در جدول ۳ آورده شده است. به نظر می رسد که سختی با مقاومت به سایش رابطه مستقیم دارد و با افزایش و کاهش سختی، مقاومت به سایش افزایش و کاهش می یابد. از آن جا که آنیل و نیتروژن دهی پلاسمایی باعث افزایش سختی پوشش های الکترولس می شوند، مقاومت سایشی این پوشش ها بهتر از پوشش عملیات نشده می باشد. ریزسختی زیرلایه در نزدیکی سطح (در فاصله ۱۰ میکرونی از فصل مشترک پوشش / زیرلایه) اندازه گیری شده است و نتایج نشان می دهد که در نمونه های آنیل شده با افزایش دمای آنیل، ریزسختی زیرلایه کاهش می یابد. در پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده، ریزسختی زیرلایه در فاصله ۱۰ میکرونی از فصل مشترک بیش تر از ریزسختی پوشش های آنیل شده است. سختی زیرلایه در این فاصله از فصل مشترک برای پوشش های آنیل شده در دماهای ۴۵۰ و ۵۰۰°C به ترتیب ۲۲۷ و $HV_{0.025}$ ۲۱۲ ویکرز است. در پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده، سختی ۲۷۹ و ۲۷۴ ویکرز می باشد (ریزسختی زیرلایه ۲۷۹ ویکرز است). دلیل سختی بیش تر فصل مشترک زیرلایه / پوشش در پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده را می توان نفوذ نیتروژن اتمی به فصل مشترک پوشش / زیرلایه بیان کرد. ریزسختی در منطقه ذکر شده برای پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال در دماهای ۴۵۰ و ۵۰۰°C، به ترتیب ۲۹۲ و ۲۸۸

جدول ۳. نتایج کاهش وزن پوشش در اثر سایش

کاهش وزن بر حسب گرم			دمای عملیات
نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال	نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول	آنیل شده	
۰/۰۱۰۴			بدون عملیات
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳۴	۴۵۰
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۴۱	۵۰۰

و پوشش قرار گرفته، سطوح تماس را کاهش داده و باعث کاهش نرخ سایش شوند. در اثر سایش پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال پودر بسیار کمی ایجاد شده که قابل جمع آوری نبودند. به همین دلیل در این تحقیق تصویری از پودرهای سایش این پوشش ها آورده نشده است.

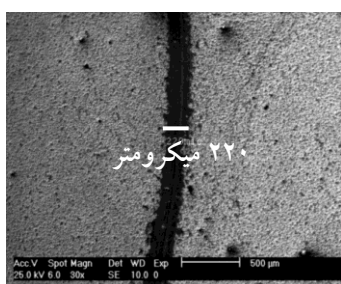
در شکل ۸ تصویر شیار، پودر سایش و اسکن خطی برای عنصر نیکل مربوط به شیار سایش پوشش الکترولس آنیل شده در دمای 450°C و در شکل ۹ برای پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده، مشاهده می شود. با مقایسه شکل ۸ و ۹ مشاهده می شود که در پوشش آنیل شده، سایش شدیدتر از پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده است. در تصاویر مربوط به پوشش آنیل شده، در بعضی نقاط کندگی پوشش مشاهده می شود.

دلیل این امر این است که پودرهای حاصل شده در اثر سایش این پوشش ها (شکل ۸ ب) دارای گوشه های تیزی هستند. این ذرات تیز در حین سایش باعث کنده شدن پوشش می شوند (سایش ساینده دو جزیی).

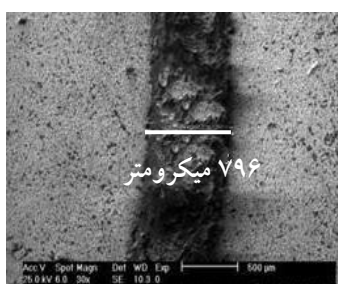
پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال در دمای 450°C است.

در شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به پودر حاصل شده در اثر سایش مشاهده می شود. برای پوشش الکترولس بدون عملیات، پودرهای سایش آگلومره شده اند ولی برای پوشش های آنیل و نیتروژن دهی پلاسمایی شده پودرهای سایش ریزتر بوده و تمایل کم تری به آگلومره شدن نشان داده اند. پودرهای سایش پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده نسبت به پوشش آنیل شده، به دلیل سختی بالاتر پوشش، ریزتر می باشند. این مشاهدات با خواص پوشش ها هم خوانی دارند. زیرا آگلومره شدن پودرهای سایش در پوشش های نرم رخ داده و ریز بودن پودرهای سایش از مشخصه پوشش های سخت می باشد [۱۷ و ۱۶].

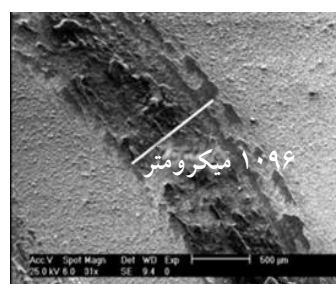
با افزایش دمای عملیات و کاهش سختی پوشش، پودرهای سایش درشت تر شده و تمایل به آگلومره شدن در آن ها افزایش یافته است. در صورتی که پودر های سایش به صورت ذرات گوشه دار باشند، سایش ساینده رخ می دهد. اما در صورت کروی بودن، ذرات می توانند در بین سطح پین



(ج)

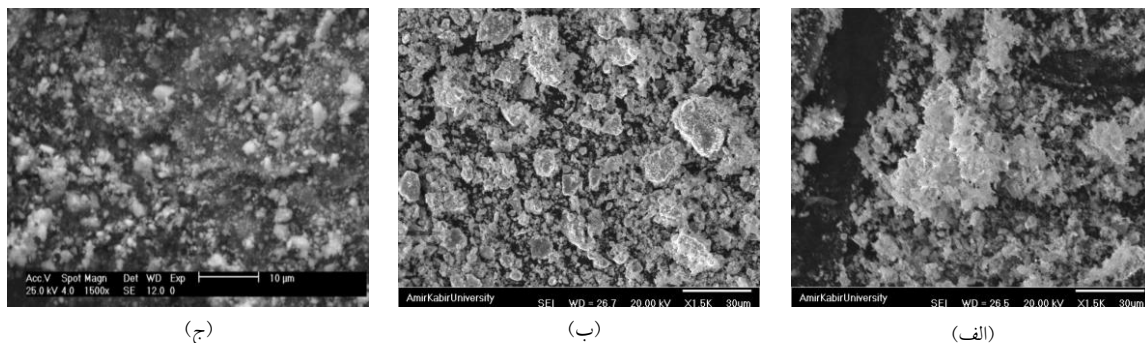


(ب)

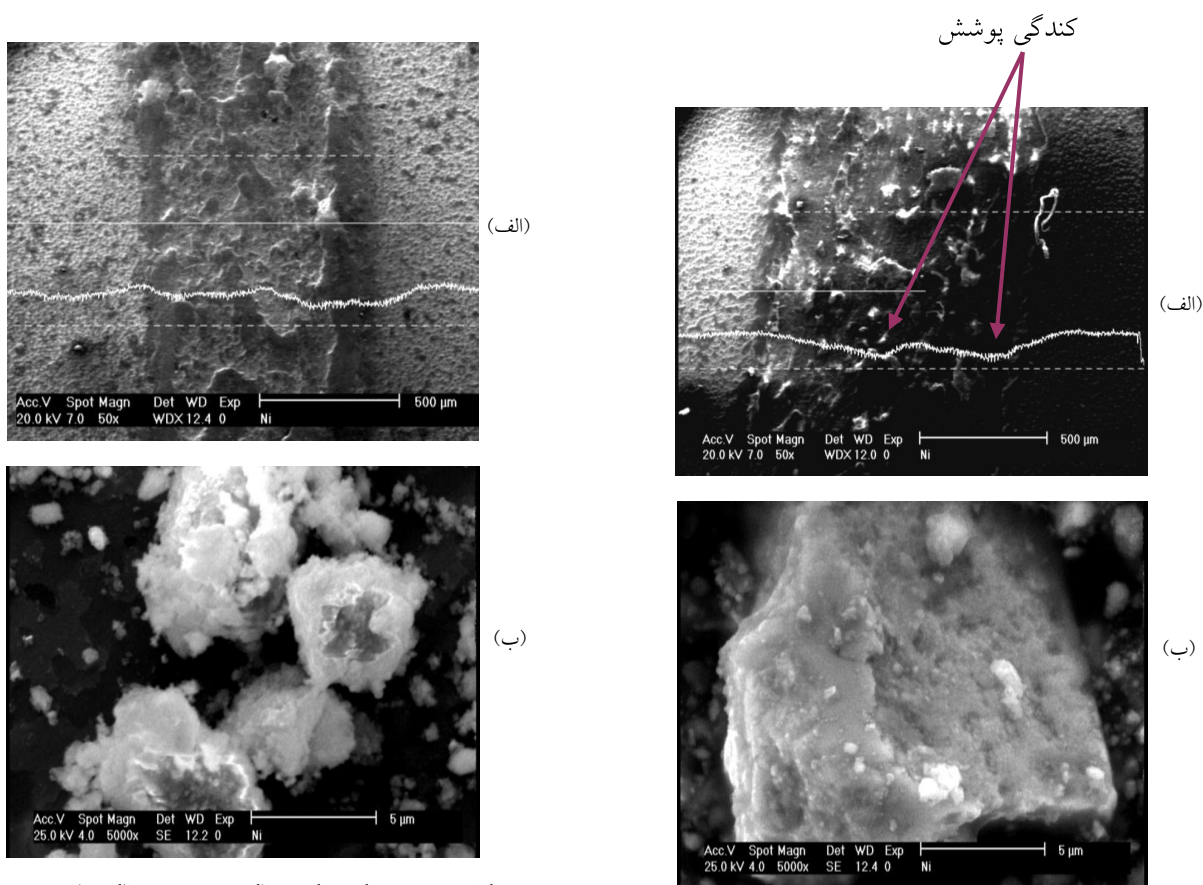


(الف)

شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به شیار سایش پوشش الکترولس نیکل - بور (الف) آنیل شده، (ب) نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول، (ج) نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال در دمای 450°C .



شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی پودر سایش پوشش (الف) بدون عملیات، (ب) آنیل شده، (ج) نیتروژن دهی پلاسمایی شده در 450°C .



شکل ۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی پوشش الکترولس نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول در 450°C (الف) آنالیز خطی سطح سایش برای عنصر نیکل، (ب) پودر سایش.

شکل ۸. تصویر میکروسکوپ الکترونی پوشش الکترولس آنیل شده در 450°C (الف) آنالیز خطی سطح سایش برای عنصر نیکل، (ب) پودر سایش.

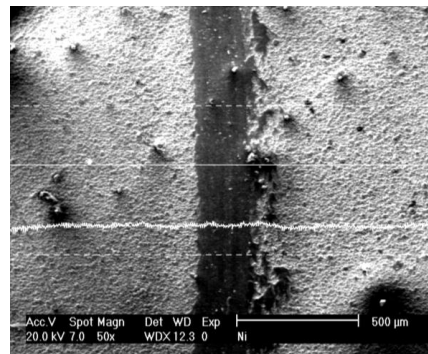
شده اند. به همین دلیل در اسکن خطی این پوشش ها مقدار نیکل سطح سایش نسبت به مقدار نیکل پوشش تغییر کم تری کرده است.

شکل ۱۰ سطح سایش پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال را نشان می دهد. همان طور که در اسکن خطی مربوط به عنصر نیکل این پوشش مشاهده می شود، این پوشش ها به مقدار بسیار کمی ساییده شده اند و مقدار نیکل سطح سایش و پوشش یکسان است.

در تصویر مربوط به پودر سایش پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده (شکل ۹)، پودر های تقریباً کروی شکلی مشاهده می شود. این پودر های کروی همانند ذرات سایش با لبه های کند عمل کرده و نرخ سایش کم تری نسبت به ذرات گوشه دار ایجاد می کنند (سایش ساینده سه جزئی). از طرفی می توان بیان کرد که به دلیل سختی بالای پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده، لبه های تیز پودرهای سایش کنده شده، پودرها خرد شده و به ذرات ریزتری تبدیل

منابع

1. G. O. Mallory and J. B. Hadju, *Electroless Plating: Fundamentals and Applications*, American Electroplaters and Surface Finishers Society, Orlando, (1991).
2. M. Anik, E. Körpe and E. Şen, *Effect of coating bath composition on the properties of electroless nickel*, Surface and Coatings Technology, 202(2008)1718–1727.
3. K. Krishnaveni, T. S. N. Sankara Narayanana and S. K. Seshadri, *Electroless Ni-B coatings: preparation and evaluation of hardness and wear resistance*, Surface and Coatings Technology, 190(2005)115–121.
4. F. Delaunois and P. Lienard, *Heat treatments for electroless nickel–boron plating on aluminum alloys*, Surface and Coatings Technology, 160(2002)239–248.
5. B. Oraon, G. Majumdar and B. Ghosh, *Improving hardness of electroless Ni–B coatings using optimized deposition conditions and annealing*, Materials and Design, 29(2008)1412–1418.
6. F. Delaunois and P. Lienard, *Heat treatments for electroless nickel–boron plating on aluminium alloys*, Surface and Coatings Technology, 160(2002)239–248.
7. A. F. Kanta, V. Vitry and F. Delaunois, *Wear and corrosion resistance behaviours of autocatalytic electroless plating*, Alloys and Compounds, 486(2009)L21–L23.
8. M. Yan, H. G. Ying and T. Y. Ma, *Improved microhardness and wear resistance of the as-deposited electroless Ni–P coating*, Surface and Coatings Technology, 202(2008)5909–5913.
9. K. Krishnaveni, T. S. N. Sankara Narayanana and S. K. Seshadri, *Electroless Ni-B and Ni-B-Si₃N₄ composite coatings - their role in surface engineering*, International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering, India, December(2004).
10. C. T. Dervosa, J. Novakovica and P. Vassiliou, *Vacuum heat treatment of*



شکل ۱۰. آنالیز خطی سطح سایش برای عنصر نیکل پوشش الکترولس نیتروژن دهی پلاسمایی شده باتوری فعال در ۴۵۰°C.

نتیجه گیری

- ۱- نیتروژن دهی پلاسمایی همانند عملیات حرارتی آنیل باعث بلوری شدن پوشش های الکترولس Ni-B می شود.
- ۲- سختی حاصل از نیتروژن دهی پلاسمایی بیش تر از عملیات حرارتی آنیل می باشد.
- ۳- زبری سطح پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول (۱/۴۳ میکرومتر)، برابر زبری سطح پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال (۱/۲ میکرومتر) است.
- ۴- مقاومت سایشی پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال به دلیل زبری سطح کم تر و سختی بالاتر این پوشش ها، بهتر از پوشش های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول و آنیل شده است. کاهش وزن پوشش آنیل شده (۰/۰۰۳۴ گرم) در دمای ۴۵۰°C، ۲/۲۶ برابر پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول (۰/۰۰۱۵ گرم) و کاهش وزن پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول، ۱۵ برابر پوشش نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال (۰/۰۰۰۱ گرم) است.

electroless Ni–B coatings, Materials Letters, 58(2004)619– 623.

11. K. Zangeneh Madar and S. M. Monir Vaghefi, *The effect of thermochemical treatment on the structure and hardness of electroless Ni–P coated low alloy steel*, Surface and Coatings Technology, 182(2004)65 –71.

۱۲. کریم زنگنه مدار و محمود منیر واقفی، تحلیل ساختاری پوشش های الکترولس نیکل - فسفر عملیات پلاسمایی شده، مجله سطح ۴ (۱۳۸۶) ۲۷-۳۵.
13. S. Corujeira Gallo and H. Dong, *On the fundamental mechanisms of active screen plasma nitriding*, Vacuum, 84(2009)321-325.
14. C. Zhao, C. X. Li, H. Dong and T. Bell, *Study on the active screen plasma nitriding and its nitriding mechanism*, Surface and Coatings Technology, 201(2006)2320-2325.
15. G. W. Stachowiak, *Wear – Materials, mechanisms and practice*, John Wiley and Sons Ltd(2005).
16. G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering tribology*, Butterworth Heinemann,(2006).