

ارزیابی رفتار مکانیکی پوشش کامپوزیتی نانو ساختار Ni-P/Al₂O₃-SiC

سارا زارعی نژاد^۱، راضیه ثانی*^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۳، ش.ص: ۱۲۰-۱۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹)

چکیده

در این پژوهش، پوشش نانو کامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC و پوشش ساده Ni-P، با استفاده از فرآیند آبکاری الکتریکی، روی زمینه‌ای از جنس مس تهیه گردید. آبکاری الکتریکی در هر دو مورد، بوسیله جریان مستقیم (DC) انجام شد. اندازه نانو ذرات SiC و نانو ذرات Al₂O₃ مورد استفاده برای تهیه حمام نانو کامپوزیت، به ترتیب ۵۵nm و ۵۰nm بود. مشخصه‌یابی و بررسی مورفولوژی سطح پوشش‌ها، به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy) و طیف نگار تفکیک انرژی (Energy Dispersive Spectroscopy) انجام گردید. رفتار تریبولوژیکی پوشش‌ها با آزمون پین روی دیسک و ریز سختی آن‌ها به روش ریز سختی سنجی ویکرز (Vickers Microhardness Test)، مورد ارزیابی قرار گرفتند. مورفولوژی سطح پوشش بعد از فرآیند سایش، بوسیله میکروسکوپ نوری بررسی گردید. نتایج نشان دادند که پوشش نانو کامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC، چسبندگی بسیار خوبی به زیر لایه مسی دارد. از سوی دیگر، مشارکت نانو ذرات آلومینا و نانو ذرات کاربید سیلیسیم در پوشش نانو کامپوزیت هیبریدی سبب بهبود خواص تریبولوژیکی و افزایش ریز سختی لایه پوشش می‌گردد که این امر را می‌توان به استحکام زیاد نانو ذرات آلومینا و کاربید سیلیسیم نسبت داد. همچنین با افزایش دانسیته جریان آبکاری، ریز سختی لایه پوشش Ni-P و Ni-P/Al₂O₃-SiC افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: نانو کامپوزیت هیبریدی، پوشش Ni-P/Al₂O₃-SiC، سایش، آبکاری الکتریکی.

^۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد گرایش خوردگی و حفاظت از مواد، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

^۲- استادیار و عضو هیات علمی، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

*- نویسنده مسئول مقاله: sani.razieh@gmail.com

پیشگفتار

امروزه بکارگیری پوشش‌های Ni-P در صنعت بدلیل دارا بودن خواص سختی و مقاومت سایشی مطلوب، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۷-۱]. در صورتیکه عملیات حرارتی بر این پوشش‌ها انجام گردد، بدلیل ایجاد فاز Ni₃P و فرآیند رسوب سختی، پوشش Ni-P می‌تواند رقیبی برای پوشش‌های کروم سخت باشد [۳ و ۴ و ۶]؛ اما تردی و یکپارچه نبودن رسوب Ni-P بعد از عملیات حرارتی، کاربردهای این نوع آلیاژ که بجای کروم سخت استفاده شود را محدود می‌کند [۶]. بنابراین یکی از روش‌های پیشنهادی برای افزایش مقاومت سایشی و ریزسختی، استفاده از روش رسوبدهی همزمان نانوذرات سرامیکی با فلز است [۵ و ۶ و ۸-۱۶]. انجام فرآیند رسوبدهی همزمان ذرات نانومتری غیرفلزی و فاز فلزی برای تشکیل پوشش نانوکامپوزیت، بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی لایه پوشش را ایجاد می‌کند. این تکنیک منجر به تولید نانوکامپوزیت زمینه فلزی می‌شود [۵ و ۶ و ۸-۱۶].

روش رسوبدهی همزمان ذرات یا نانوذرات همراه با فلز از الکترولیت، روشی نوین برای تهیه پوشش‌های نانوکامپوزیت زمینه فلزی است. این فرآیند شامل استفاده از ذرات و یا نانوذرات در حمام آبکاری و سپس وارد شدن این نانوذرات همزمان با رسوبدهی فلز می‌باشد. به این طریق نانوذرات وارد لایه پوشش می‌گردند [۵ و ۶ و ۸-۱۶].

تکنیک ذکر شده، بدلیل سهولت در تولید و مهیا سازی تجهیزات، برای تهیه پوشش‌های نانوکامپوزیت فلزی کاربرد فراوانی دارد. بر اساس گزارشات منتشر شده، این روش تهیه لایه نانوکامپوزیت نسب به سایر روش‌های پوشش‌دهی اقتصادی‌تر است [۱۴ و ۱۱ و ۱۶].

لایه پوشش نانوکامپوزیت زمینه فلزی، بدلیل وجود نانوذرات اکسیدی، دارای سختی و استحکام بالایی می‌باشد. دلیل این پدیده، مکانیزم سخت شدن، توسط ذرات اکسیدی^۱ است. همچنین در مواردی، اندازه دانه لایه پوشش نانوکامپوزیت، با اضافه کردن نانوذرات سرامیکی

کاهش می‌یابد و این پدیده به نوبه خود سبب افزایش سختی و استحکام لایه پوشش می‌گردد [۸-۱۶].

در فرآیند تهیه پوشش نانوکامپوزیت زمینه فلزی، از ذرات یا نانوذرات سرامیکی مانند SiO₂، SiC، Al₂O₃، WC، TiO₂ و می‌توان استفاده کرد. خواص پوشش-های نانوکامپوزیت زمینه فلزی با اضافه کردن نانوذرات سرامیکی، وابسته به اندازه، درصد و توزیع نانوذرات وارد شده در لایه پوشش و جنس نانوذرات تغییر می‌کنند [۵ و ۶ و ۸-۱۶].

اکثر محققین از نیکل به‌عنوان فاز زمینه استفاده کرده و اکسیدها و یا کاربیدهای سرامیکی را به‌عنوان فاز دوم وارد زمینه کرده‌اند. مثلاً پوشش نانوکامپوزیتی Ni/SiC را تولید کرده و این مطلب را نشان دادند که میکروسختی و مقاومت به سایش و خوردگی پوشش تهیه شده، با اضافه کردن SiC و افزایش آن در لایه پوشش، بهبود می‌یابد. گروهی دیگر، پوشش نانوکامپوزیتی Ni/Al₂O₃ را تهیه کرده و نشان دادند که مقاومت به خوردگی لایه پوشش با اضافه کردن نانوذرات Al₂O₃ افزایش می‌یابد [۱۱].

همان‌گونه که ذکر گردید هر ذره سرامیکی خصوصیت خاصی به لایه پوشش و زمینه فلزی می‌دهد. مثلاً برخی ذرات سرامیکی باعث بهبود خواص مکانیکی و برخی باعث بهبود خواص خوردگی لایه پوشش می‌شوند [۵ و ۶ و ۸-۱۶]. از این‌رو انتظار می‌رود با اضافه کردن دو یا چند نانو ذره سرامیکی، بتوان خواص بهتری را بدست آورد.

در این تحقیق ابتدا تهیه پوشش ساده Ni-P و سپس تهیه پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC و تاثیر همزمان دو نانوذره سرامیکی بر لایه پوشش Ni-P برای اولین بار، مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات Al₂O₃ بدلیل خواص برتر مقاومت به خوردگی و نیز خواص مطلوب مکانیکی و نانوذرات SiC بدلیل خواص خوب مکانیکی (از جمله مقاومت سایشی و سختی) و مقاومت به خوردگی، مورد نظر قرار گرفت. در ادامه مورفولوژی سطح، میکروساختار، ریزسختی و مقاومت

¹-Dispersion Hardening

از فرآیند آبکاری، حمام به مدت ۲۴ ساعت با همزن مغناطیسی هم زده شده است تا نانوذرات سرامیکی کاملاً در حمام آبکاری پراکنده شوند. بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز عنصری ترکیب پوشش بوسیله طیف نگار تفکیک انرژی (EDS) انجام گردید. برای آزمون ریزسختی، نمونه‌ها در حمام‌های مورد نظر با شرایط خاص، به مدت زمان ۱۵ دقیقه آبکاری شده‌اند. ریزسختی لایه پوشش بوسیله آزمایش ریزسختی سنجی و با اعمال نیروی ۱۰g، بررسی شده است. نیروی مورد نظر برای آزمایش ریز سختی با روش سعی و خطا بدست آمده است. به منظور افزایش اعتبار نتایج این آزمون ۵ مرتبه بر روی سطح مقطع لایه پوشش انجام گردید و میانگین نتایج مورد استفاده قرار گرفت. آبکاری نمونه‌های سایش، در حمام‌های ذکر شده با دانسیته جریان 5 A/dm^2 و به مدت زمان ۴۵ دقیقه انجام گردید. برای ارزیابی رفتار تریبولوژی نمونه‌ها از ماشین پین بر روی دیسک استفاده شد. مسافت طی شده برای هر نمونه سایشی ۲۰۰ متر و نیروی اعمالی جهت سایش ۲۰۰g بوده است. تعیین مسافت طی شده و نیروی اعمالی با روش سعی و خطا بدست آمده است. پین مورد استفاده در آزمون سایش، پین استاندارد و از جنس فولاد سخت شده با قطر 0.5 cm انتخاب گردید. آزمون سایش در اتمسفر هوا و تحت سرعت ۶۲ rpm انجام شد.

سایشی پوشش ساده و پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

آند از جنس نیکل تقریباً خالص ۹۹٪ و کاتد از جنس مس انتخاب گردید. برای بررسی مورفولوژی سطح و آزمون ریزسختی، ابعاد کاتد $3 \times 3 \text{ cm}^2$ و ضخامت 0.2 mm و جهت آزمون سایش ابعاد کاتد $2 \times 2 \text{ cm}^2$ و ضخامت 0.85 mm انتخاب شد. ابتدا نمونه‌های مسی، در استن به مدت زمان ۲۰ ثانیه چربی‌زدایی شدند، سپس با آب مقطر شسته شده و وارد حمام الکتروپلیش گردیده‌اند. جدول ۱ ترکیب حمام و شرایط الکتروپلیش را نشان داده است. بعد از انجام عملیات الکتروپلیش روی نمونه‌های مسی، فرآیند پوشش‌دهی انجام گردید. جدول ۲ ترکیب حمام برای فرآیند پوشش‌دهی در مورد نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی را نشان داده است. ترکیبات این حمام، حمام وات بود که به آن، به صورت سعی و خطا، منبع تهیه فسفر اضافه گردید [۱۷]. در مورد تهیه پوشش ساده Ni-P، مشابه با ترکیب حمام گزارش شده در جدول ۲، اما بدون اضافه کردن نانو ذرات آلومینا و نانوذرات کاربید سیلیسیم، حمام تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه پوشش‌های نانوکامپوزیت هیبریدی، قبل

جدول ۱- ترکیب حمام الکتروپلیش و شرایط اعمال آن.

ترکیب حمام الکتروپلیش	اسید فسفریک الکل اتیلیک آب مقطر	یک حجم یک حجم دو حجم
شرایط اعمال الکتروپلیش	زمان ولتاژ آند کاتد	۱ دقیقه ۶ولت مس سرب

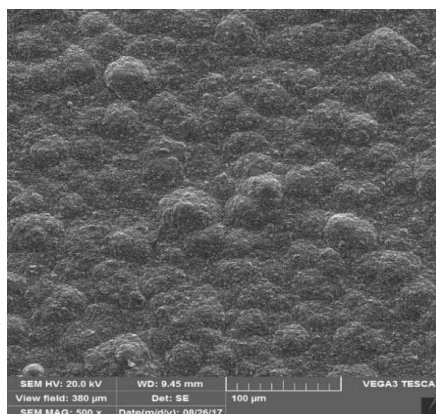
جدول ۲- ترکیب حمام آبکاری پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC

غلظت	ترکیب شیمیایی
۲۴۰ g/lit	سولفات نیکل NiSO ₄ .6H ₂ O
۳۵ g/lit	کلرید نیکل NiCl ₂ .6H ₂ O
۳۰ g/lit	اسید بوریک H ₃ BO ₄
۱۲ g/lit	اسید فسفریک H ₃ PO ₄
۱۰ g/lit	نانو ذرات آلومینا با میانگین اندازه دانه ۵۰ نانومتر
۱۰ g/lit	نانوذرات کاربید سیلیسیم با میانگین اندازه دانه ۵۵ نانومتر
۳/۵	pH
۶۰ C°	دما
۲۰۰ rpm	سرعت همزدن
۱۵ min.	زمان آبکاری
۲-۱۲ A/dm ²	دانسیته جریان

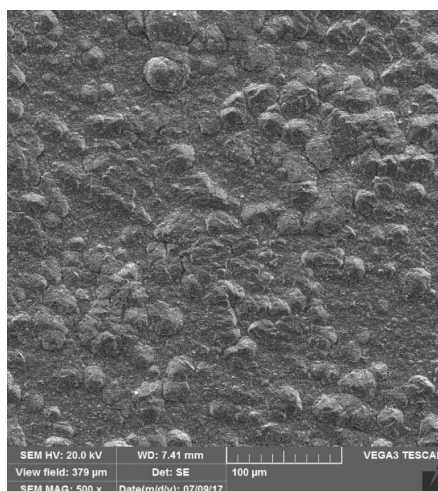
ریز دانه شدن لایه پوشش است (با توجه به بزرگنمایی یکسان دو تصویر ریز دانه شدن لایه پوشش نانوکامپوزیتی مشهود است)؛ زیرا وجود نانوذرات آلومینا و کاربید سیلیسیم در لایه پوشش، سبب ایجاد مناطق جدید جوانه-زنی گردیده است. این امر سبب ریز دانه شدن ساختار لایه پوشش و کاهش تخلخل، نسبت به حالت پوشش بدون نانوذره سرامیکی می شود.

نتایج و بحث

شکل ۱ و شکل ۲، تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پوشش نیکل-فسفر و پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی است. شکل ۱ ساختار گل کلمی را برای پوشش نیکل-فسفر نشان می دهد. شکل ۲ مشخص کننده ورود نانوذرات سرامیکی به لایه پوشش و همچنین



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۵۰۰، از سطح پوشش Ni-P در دانسیته جریان ۵ A/dm²



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی ۵۰۰، از سطح پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی ۵۰۰، از سطح پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی

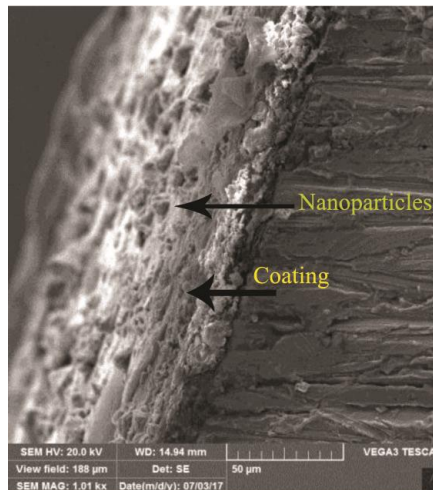
بیان تفاوت درصد نانو ذرات وارد شده در لایه پوشش و تاثیر این نانوذرات بر هم، هنوز بطور کامل مشخص نیست. بنظر می‌رسد که این تفاوت ناشی از دانسیته و اندازه نانوذره، همچنین آبدوست و یا غیر آبدوست بودن ذره و اثر پتانسیل زتا (برآیند بار جذب شده به سطح ذرات) و باشد [۱۱ و ۱۴ و ۱۸ و ۱۹]. مثلاً ذراتی که دارای خاصیت آبدوست هستند، در نتیجه برخورد و واکنش قوی با الکترولیت، انرژی سطحی‌شان کاهش می‌یابد. کاهش انرژی سطحی سبب می‌گردد تا ذرات حالت معلق بودن خود را در الکترولیت حفظ کنند؛ اما با افزایش خاصیت معلق بودن از چسبندگی بر سطح کاتد کاسته می‌شود. از طرفی چسبندگی ذراتی که خاصیت غیر آبدوست را دارند به سطح کاتد، بسیار قوی است. بنابراین این ذرات براحتی روی سطح کاتد می‌نشینند و در نتیجه رسوبدهی بهتری را ایجاد می‌کنند، البته در برخی موارد رسوب تولید شده متخلخل و زبر است. گاهی برای تولید پوشش مواد مرکب، نه پودر دارای خاصیت آبدوست درصد و نه پودر دارای خاصیت غیر آبدوست کامل، مناسب است [۱۱ و ۱۴ و ۱۸ و ۱۹]. آنالیز EDX بیانگر این مطلب است که پوشش نیکل فسفر ساده و نیکل فسفر هیبریدی در دسته پوشش‌های نیکل فسفر کم (کاهش درصد وزنی فسفر) قرار دارد. همچنین با افزایش دانسیته جریان درصد وزنی عنصر فسفر، در

شکل ۳، تصویر تهیه شده از سطح مقطع لایه پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی است. قسمت سفید رنگ، لایه پوشش و ذرات تیره، نانوذرات سرامیکی می‌باشند. همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، نانوذرات سرامیکی روی سطح قرار گرفته و وارد لایه پوشش شده‌اند. با توجه به شکل ۳ چسبندگی لایه پوشش به زیر لایه مناسب است و هیچ اثری از حفره یا ترک دیده نمی‌شود.

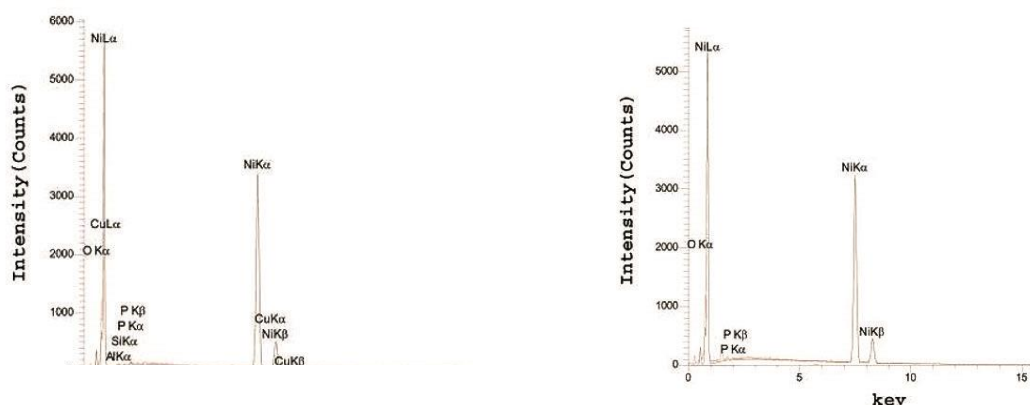
شکل ۴، طیف نگار تفکیک انرژی (EDS) در مورد پوشش نیکل- فسفر و پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص شده است، اثر عناصر Al و Si دیده می‌شود. عناصر Al و Si، نشان دهنده ورود نانوذرات Al_2O_3 و SiC به درون لایه پوشش است؛ زیرا این عناصر در آنالیز مربوط به پوشش ساده نیکل- فسفر دیده نمی‌شود. از سوی دیگر با توجه به پیک-های موجود، نیکل اصلی‌ترین عنصر در لایه پوشش در هر دو نوع پوشش بشمار می‌رود. جدول ۳ نتایج آنالیز EDS را در مورد پوشش‌های نیکل- فسفر و نانوکامپوزیت هیبریدی نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳، عنصر نیکل، بیش‌ترین درصد وزنی را دارد. اثر عناصر Si و Al در پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی دیده می‌شود و عنصر Al دارای درصد بیشتری است. به بیان دیگر عنصر Al به میزان بیشتری وارد لایه پوشش شده است. مکانیزم دقیق برای

افزایش دانسیته جریان آبکاری سبب افزایش درصد نانوذرات سرامیکی در لایه پوشش می گردد؛ زیرا با افزایش دانسیته جریان قدرت جذب نانوذرات توسط کاتد بیش تر می گردد. افزایش درصد نانوذرات سرامیکی در لایه پوشش می تواند دلیلی بر افزایش ریز سختی لایه پوشش با افزایش دانسیته جریان باشد که در ادامه مورد مطالعه قرار می گیرد.

پوشش ساده نیکل- فسفر، بیش تر از پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی است. بنابراین با وارد شدن نانوذرات سرامیکی در حمام آبکاری و وارد شدن آن ها به درون لایه پوشش، درصد وزنی فسفر در لایه پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی کاسته شده است. این نتیجه نیز مشابه با نتایج تحقیقات محققینی است که در زمینه پوشش های کامپوزیتی نیکل- فسفر تحقیق کرده اند [۶]. همچنین با توجه به جدول ۳،



شکل ۳- تصویر تهیه شده از سطح مقطع پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC



شکل ۴- نمودارهای مربوط به پوشش (A) نیکل- فسفر، (B) نانوکامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC

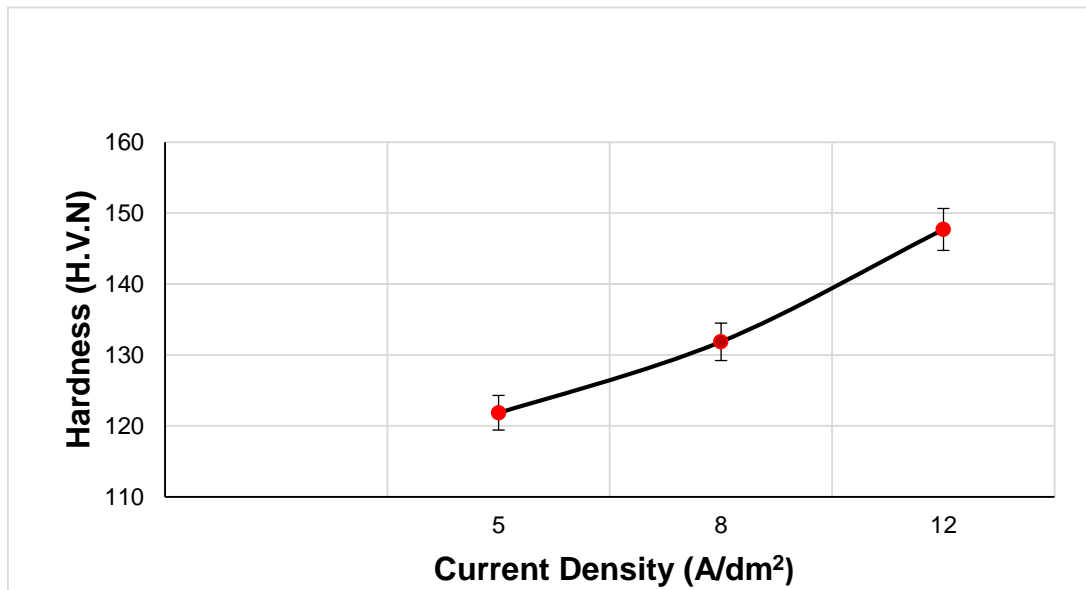
جدول ۳- نتایج آنالیز EDS انجام شده بر حسب درصد وزنی بر روی نمونه‌های آبکاری شده با شدت جریان‌های 5 A/dm^2 و 12 A/dm^2

شدت جریان (A/dm^2)	پوشش Ni-P			پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی Ni-P/ Al_2O_3 -SiC				
	Ni(wt%)	P(wt%)	O(wt%)	Ni(wt%)	P(wt%)	O(wt%)	Al(wt%)	Si(wt%)
۵	۹۳/۸۵	۰/۱۸	۵/۹۷	۹۲/۵۴	۰/۴۶	۶/۲۹	۰/۴۷	۰/۲۵
۱۲	۹۳/۴۳	۰/۲۹	۶/۲۸	۸۸/۲۱	۰/۱۷	۷/۱۹	۳/۱۲	۰/۲۷

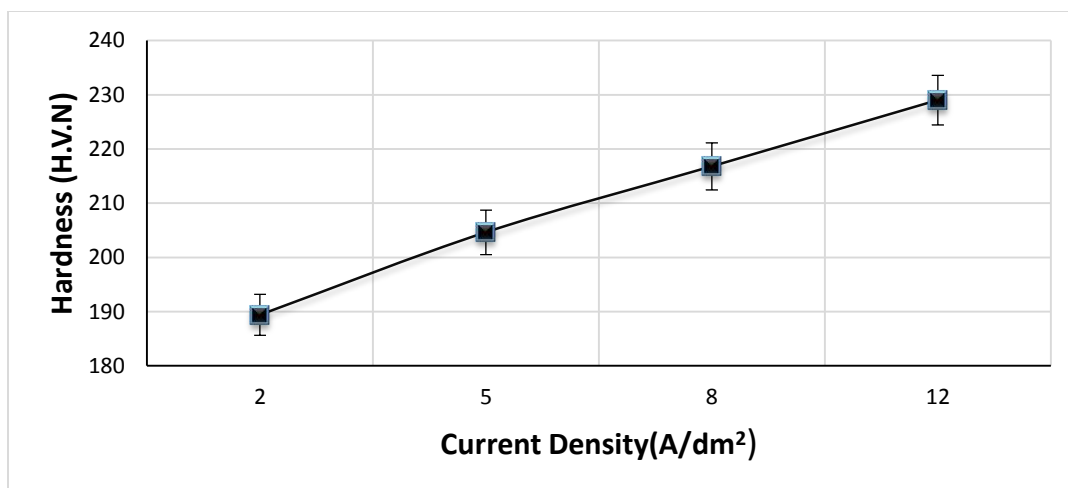
نانوکامپوزیت هیبریدی در یک دانسیته جریان مشخص، بالاتر از ریزسختی پوشش نیکل- فسفر می‌باشد. این مطلب به دلیل وارد شدن نانوذرات سخت سرامیکی به درون پوشش است (نتایج طیف نگار انرژی (EDS) حضور ذرات سرامیکی را نشان می‌دهد). از سوی دیگر افزایش ریزسختی پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی را می‌توان به مکانیزم استحکام دهی Orowan ربط داد [۸]. چون نانوذرات سخت سرامیکی تغییر فرم پلاستیک زمینه را کم‌تر کرده و سبب افزایش عدد ریزسختی گردیده‌اند. همچنین اضافه کردن نانوذرات سخت سرامیکی به حمام آبکاری و وارد شدن آن‌ها در لایه پوشش، سبب ریز دانه شدن لایه پوشش و افزایش ریزسختی می‌گردد [۱۱]. افزایش ریز سختی در این مورد را می‌توان به رابطه Hall-Petch نسبت داد [۸]. با توجه به جدول ۳ و شکل ۶، افزایش دانسیته جریان آبکاری، همچنین سبب افزایش درصد وزنی نانوذرات سرامیکی در لایه پوشش و در نتیجه افزایش ریزسختی لایه پوشش نانوکامپوزیتی می‌شود. تحقیقات دیگر نیز، افزایش ریزسختی پوشش نانوکامپوزیت (با وارد شدن ذرات سرامیکی به لایه پوشش) نسبت به پوشش ساده، را بیان کردند [۱۴ و ۸].

شکل ۵ بیانگر این مطلب است که با افزایش دانسیته جریان، سختی پوشش نیکل - فسفر افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع، افزایش مکان‌های هسته گذاری با افزایش دانسیته جریان آبکاری، ریز دانه شدن و کاهش حفرت در لایه پوشش است. این مطلب در تحقیقات دیگر نیز گزارش شده است [۲۰]. با توجه به نتایج طیف نگار انرژی، شکل ۴ و جدول ۳، افزایش دانسیته جریان آبکاری (در مورد پوشش نیکل فسفر ساده) سبب افزایش درصد فسفر در لایه پوشش می‌شود. افزایش درصد فسفر از یکسو سبب ایجاد تنش‌های پسماند در لایه پوشش و افزایش ریز سختی و از سوی دیگر مراکز برای هسته گذاری و در نتیجه سبب ریزدانه شدن لایه پوشش می‌گردد [۴].

شکل ۶ تاثیر دانسیته جریان آبکاری بر ریزسختی پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، افزایش دانسیته جریان (همراه با ثابت نگه داشتن متغیرهایی مانند سرعت همزدن، دما، غلظت مواد سرامیکی، زمان آبکاری و pH حمام آبکاری)، موجب افزایش ریزسختی پوشش می‌گردد. اگر شکل ۵ و شکل ۶ مقایسه شود، می‌توان بیان کرد که ریزسختی پوشش‌های



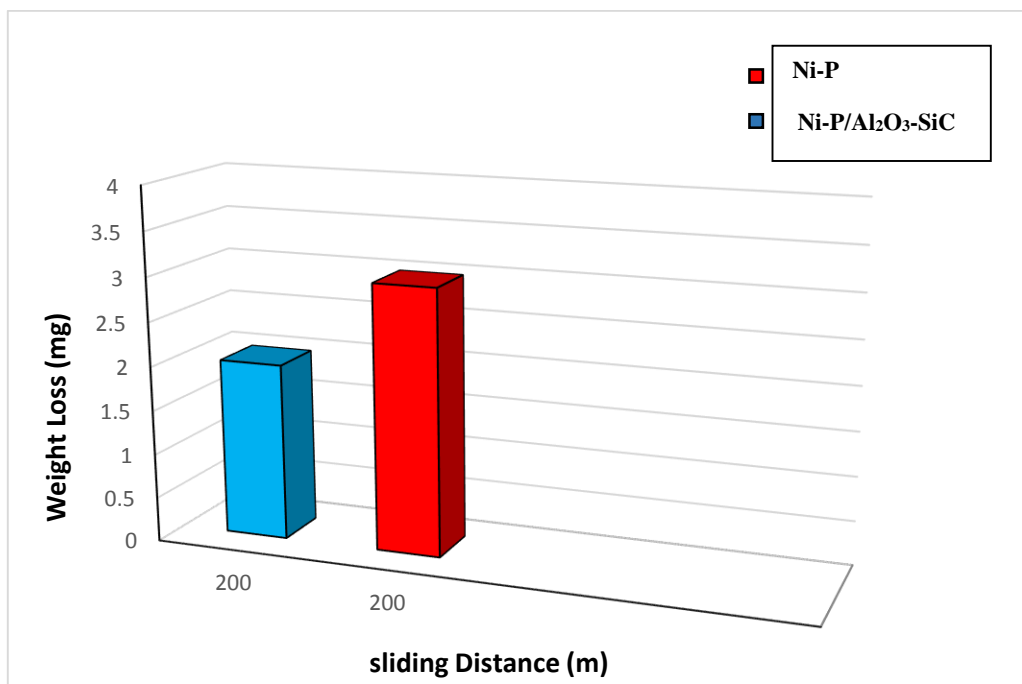
شکل ۵- تغییرات ریزسختی با دانسیته جریان آبکاری برای پوشش‌های Ni-P (مدت زمان آبکاری ۱۵min)



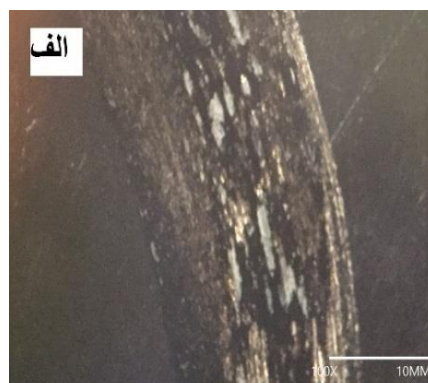
شکل ۶- تاثیر افزایش دانسیته جریان بر ریزسختی پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC (مدت زمان آبکاری ۱۵ min.)

شکل ۸، تصاویر مربوط به سطح پوشش نیکل- فسفر ساده در بزرگنمایی ۱۰۰ و ۴۰۰ و شکل ۹، تصاویر مربوط به سطح پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی در بزرگنمایی ۱۰۰ و ۴۰۰، بعد از فرآیند سایش است. مقایسه سطح اثر ساییده شده در شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد که بعد از فرآیند سایش، عرض پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی باریک‌تر گردیده و عمق شکاف کمتری نسبت به پوشش نیکل- فسفر را دارا می‌باشد.

شکل ۷، رفتار سایشی نمونه‌های پوشش نیکل- فسفر و پوشش نیکل- فسفر/آلومینا- کاربید سیلیسیم که در دانسیته جریان ۵ A/dm² و مدت زمان ۴۵min آبکاری شده‌اند را نشان می‌دهد. همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر گردید، در آزمایش سایش مسافت طی شده ۲۰۰m و نیروی اعمالی ۲۰۰g بوده است. شکل ۷ بیانگر این است که نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی کاهش وزن کم‌تر و یا مقاومت به سایش بیشتری نسبت به نمونه‌های پوشش ساده از خود نشان می‌دهند.



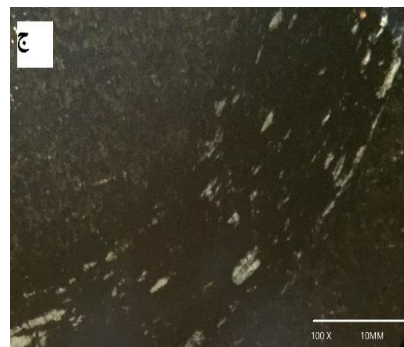
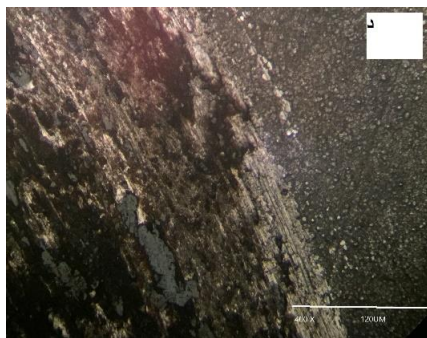
شکل ۷- کاهش وزن پوشش Ni-P و پوشش نانوکامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC پس از ۲۰۰ متر مسافت لغزش



شکل ۸- سطح سایش پوشش Ni-P، الف) بزرگنمایی ۱۰۰ (ب) بزرگنمایی ۴۰۰

سطح سایش نمونه نانوکامپوزیت هیبریدی نسبت به سطح سایش نمونه نیکل-فسفر ساده، کاهش می یابد. از سوی دیگر سطح سایش باریکتر شده و تا حدودی اثراتی از خراش روی سطح دیده می شود. این امر بیانگر مقاومت به سایش بیشتر این پوشش است. با توجه به سطح اثر سایش نمونه نانوکامپوزیت هیبریدی، این امکان وجود دارد که مکانیزم سایش در این نوع پوشش، مکانیزم خراشان- چسبان باشد [۲۱ و ۲۲].

با توجه به تصاویر ۸ و ۹ می توان بیان کرد که سطح سایش پوشش نیکل-فسفر ساده به دلیل سختی کم، دچار تغییر شکل پلاستیک شده است از سوی دیگر اثری از ترک روی این سطح دیده نمی شود و تنها اثراتی از له شدن لایه پوشش با اعمال نیروی سایشی قابل رویت است. از اینرو می توان نتیجه گرفت که مکانیزم غالب در سایش این نمونه، مکانیزم سایش چسبان می باشد. با اضافه کردن نانو- ذرات کاربید سیلیسیم و نانوذرات آلومینا به لایه پوشش،



شکل ۹ - سطح سایش پوشش کامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC، (ج) بزرگنمایی ۱۰۰ (د) بزرگنمایی ۴۰۰

- ۳- افزایش دانسیته جریان آبکاری سبب افزایش ریز سختی پوشش نانو کامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC می گردد.
- ۴- با افزایش دانسیته جریان آبکاری، نتایج مربوط به آنالیز طیف نگار انرژی (EDS)، کاهش درصد وزنی عنصر فسفر، با اضافه شدن نانوذرات سرامیکی به حمام آبکاری و وارد شدن آن به لایه پوشش را نسبت به پوشش Ni-P نشان می دهد.
- ۵- وجود نانوذرات سرامیکی Al₂O₃ و SiC در لایه پوشش موجب افزایش ریزسختی و مقاومت سایشی پوشش نانو کامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC نسبت به پوشش Ni-P می شود.

References:

1- C. Ma S.C. Wang, L.P. Wang, F.C. Walsh, R.J.K. Wood, "The electrodeposition and characterisation of low-friction and wear-resistant Co-Ni-P coatings", Surface & Coatings Technology, V. 235, pp. 495-505, 2013.

2- Yu. E. Sknar, O.O. Savchuk, I.V. Sknar, "Characteristics of electrodeposition of Ni and Ni-P alloys from methanesulfonate electrolytes", Applied

بهبود مقاومت سایشی پوشش نانو کامپوزیت هیبریدی نسبت به پوشش ساده نیکل- فسفر را می توان به وجود نانوذرات سرامیکی در لایه پوشش و ریز دانه شدن لایه پوشش نیز ربط داد. این مطلب در تحقیقات دیگر نیز مشاهده شده است [۸ و ۱۴]. با توجه به بهبود ریزسختی لایه پوشش نانو کامپوزیت هیبریدی نسبت به پوشش ساده، می توان بیان کرد که ریزسختی لایه پوشش مستقیماً بر مقاومت سایشی آن اثر دارد [۴].

نتیجه گیری

- ۱- نتایج مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف نگار انرژی (EDS) تهیه پوشش Ni-P و پوشش نانو کامپوزیت هیبریدی Ni-P/Al₂O₃-SiC را نشان می دهد.
 - ۲- با افزایش دانسیته جریان آبکاری، ریز سختی پوشش Ni-P افزایش می یابد.
- Surface Science, V. 423, pp. 340-348, 2017.
- 3- Akio Yonezu, Michihiro Niwa, Jiping Ye, Xi Chen, "Contact fracture mechanism of electroplated Ni-P coating upon stainless steel substrate", Materials Science & Engineering A, V. 563, pp. 184-192, 2013.
- 4- D.H. Jeong, U. Erb, K.T. Aust, G.

- Palumbo, "The relationship between hardness and abrasive wear resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-P coatings", *Scripta Materialia*, V. 48, pp. 1067–1072, 2003.
- 5- W.E.G. Hansal, G. Sandulache, R. Mann, P. Leisner, "Pulse-electrodeposited NiP-SiC composite coatings", *Electrochimica Acta*, V. 114, pp. 851– 858, 2013.
- 6- Hung-Hua Sheu, Pao-Chang Huang, Lin-Chang Tsai, Kung-Hsu Hou, "Effects of plating parameters on the Ni-P-Al₂O₃ composite coatings prepared by pulse and direct current plating", *Surface & Coatings Technology*, V. 235, pp. 529–535, 2013.
- 7- Mohammad Islam, Muhammad Rizwan Azhar, Narjes Fredj, T. David Burleigh, "Electrochemical impedance spectroscopy and indentation studies of pure and composite electroless Ni-P coatings", *Surface & Coatings Technology*, V. 236, pp. 262–268, 2013.
- 8- Wei Wang , Feng-Yan Hou , Hui Wang ,He-Tong Guo , "Fabrication and characterization of Ni-ZrO₂ composite nano-coatings by pulse electrodeposition", *Scripta Materialia*, Vol. 53, pp. 613–618, 2005.
- 9- Lidia Benea, Sorin-Bogdan Basa, Eliza Danaila, Nadege Caron, Olivier Raquet, Pierre Ponthiaux, "Fretting and wear behaviors of Ni/nano-WC composite coatings in dry and wet conditions", *Materials and Design*, Vol. 65, pp. 550–558, 2015.
- 10- Xinyu Zhang, Jiaqian Qin, Thanyanant Perasinjaroen, Wichitra Aeksen, MalayKumar Das, RuruHao, Bing Zhang, Panyawat Wangyao, Yuttanant Boonyongmaneerat, Sarintorn Limpanart, Mingzhen Ma, Riping Liu, "Preparation and hardness of pulse electrodeposited Ni-W-diamond composite coatings", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 276, pp. 228–232, 2015.
- 11- M. Alizadeh, M. Mirak, E. Salahinejad, M. Ghaffari, R. Amini, "Structural characterization of electrocodeposited Ni-Al₂O₃-SiC nanocomposite coatings", *Journal of Alloys and Compound*, Vol.611, pp. 161-166, 2014.
- 12- V. Medeliene, "The influence of B₄C and SiC additions on the morphological, physical, chemical and corrosion properties of Ni coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 154, pp. 104–111, 2002.
- 13- Denny Thiemig, Andreas Bund, "Characterization of electrodeposited Ni-TiO₂ nanocomposite coatings", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 2976–2984, 2008.
- 14- Tushar Borkar, Sandip P. Harimkar, "Effect of electrodeposition conditions and reinforcement content on microstructure and tribological properties of nickel composite coatings", *Surface & Coatings Technology*. Vol. 205, pp. 4124–4134, 2011.
- 15- I. Garcia, J. Fransaer, J.-P. Celis, " Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 148, pp. 171–178, 2001.
- 16- Zhongcheng Guo , Xiaoyun Zhu, "Studies on properties and structure of electrodeposited RE-Ni-W-B-SiC composite coating", *Materials Science and Engineering A*, Vol.363, pp. 325–329, 2003.

۱۷- محمد قربانی، "پوشش دادن فلزات"، جلد ۱،
موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، چاپ سوم.

18- N. Periene, A. Cesuniene and E. Matulioni, "Codeposition of Mixtures of Dispersed Particles With Nickel-Phosphorus Electrodeposits", *Plating and Surface Finishing*, Vol. 81, pp.68-71, October 1994.

19- S.H. Yeh and C.C. Wan, "A Study of SiC/Ni Composite Plating in the Watts Bath", *Plating and Surface Finishing*, Vol. 84, pp. 54-58, March 1997.

20- G. Devaraj and S.K. Seshadri,

"Pulsed Electrodeposition of nickel", *Plating and Surface Finishing*, Vol. 83, pp.62-66, June 1996.

21- A.Araghi, M.H.Paydar, "Electroless deposition of Ni-P-B4C composite coating on AZ91D magnesium alloy and investigation on its wear and corrosion resistance", *Materials & Design*, Vol. 31, pp.3095-3099, June 2010.

22- M. Ebrahimian, M. Moonir Vaghefi, Kamran Azari, "Wear Behavior of Electroless Ni-P-B4C Composite Coatings", *Wear*, Vol. 260, pp. 123-127, 2006.