

# بررسی تأثیر غلظت ذرات SiC در الکترولیت بر خواص تریبولوژیکی پوشش کامپوزیتی Ni-SiC حاصل از آبکاری الکترولیتی با جریان منقطع

ارمیا آقایی<sup>۱\*</sup>، علیرضا نصرافصهانی<sup>۲</sup>، امید یعقوبی زاده<sup>۳</sup>، امیر رضا خضزلو<sup>۴</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه، ساوه، ایران

۲- مربی و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه، ساوه، ایران

ermia.aghaee@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۹/۰۳، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۲/۰۶)

## چکیده:

در این تحقیق از یک حمام وات، حاوی ذرات کاربید سیلیسیم با اندازه دانه ۰/۵ الی ۵ میکرومتر و با استفاده از روش آبکاری الکترولیتی با جریان منقطع، پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم بر روی زیر لایه مس ایجاد گردید. این پوشش‌ها دارای سختی و مقاومت سایشی بسیار بالایی می‌باشند که در ابزار آلات، صنایع و اتومبیل سازی کاربرد بسیاری دارند. تأثیر غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت بر مورفولوژی، میکروسختی، ضریب اصطکاک، جهات ترجیحی رشد بلورهای نیکل و میزان نرخ سایش مورد بررسی قرار گرفت. پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و دستگاه تفرق اشعه ایکس مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش میزان غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت باعث کاهش ضریب اصطکاک، افزایش سختی، بهبود خواص سایشی و کاهش میزان نرخ سایش پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم می‌شود. همچنین افزایش میزان درصد ذرات کاربید سیلیسیم نه تنها باعث کاهش اندازه دانه بلورهای نیکل، بلکه باعث تغییر جهات ترجیحی رشد بلوهای نیکل نیز می‌شود.

## واژه‌های کلیدی:

آبکاری الکترولیتی، کاربید سیلیسیم، میکروسختی، سایش، پوشش کامپوزیتی.

## ۱- مقدمه

الکتروشیمیایی می‌باشد. معمولاً برای پوشش دهی از جریان مستقیم استفاده می‌شود. در مقایسه با آبکاری با جریان مستقیم، استفاده از جریان منقطع باعث یکنواختی پوشش، کاهش دانسیته و افزایش میزان درصد فاز ثانویه در زمینه فلزی می‌گردد. جریان منقطع در آبکاری الکترولیتی باعث ایجاد اختلال در پدیده جذب و واجدبی در فصل مشترک کاتد و الکترولیت می‌شود

یکی از روش‌های رسوب ذرات سخت در زمینه فلزی، آبکاری الکترولیتی می‌باشد. این روش به دلیل دمای کاری پایین آن، هزینه کم و امکان تولید پوشش‌های مختلف با تغییر پارامترهای آبکاری، بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱-۴]. جهت آبکاری الکترولیتی می‌توان از دو جریان مستقیم و منقطع بهره جست. مکانیزم پوشش دهی در هر دو حالت به صورت

پوشش‌دهی دمای الکترولیت در حدود  $55^{\circ}\text{C}$  ثابت نگه داشته شد که برای انجام این امر، بشر  $1000\text{CC}$  حاوی الکترولیت، داخل بشر  $3000\text{CC}$  حاوی آب با دمای مورد نظر، قرار گرفت. الکترولیت مورد استفاده از نوع حمام وات بود که ترکیب شیمیایی آن، پارامترها و همچنین متغیرهای قابل کنترل فرآیند پوشش‌دهی کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم به روش آبکاری الکترولیتی با جریان منقطع در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): ترکیب الکترولیت و شرایط انجام آزمایش

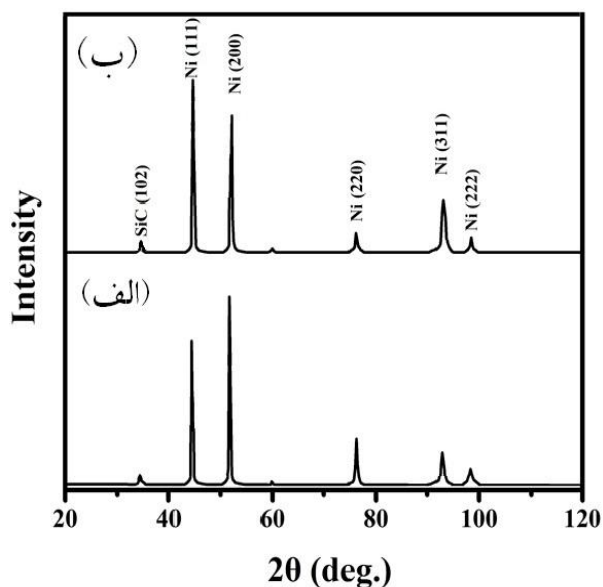
پارامترهای پوشش‌دهی	مقدار
$\text{NiSO}_4$	$350\text{ g/L}$
$\text{NiCl}_2$	$45\text{ g/L}$
$\text{H}_3\text{BO}_3$	$30\text{ g/L}$
$\text{SiC}$	$20, 40, 60, 80\text{ g/L}$
دانشیه جریان	$8\text{ A/dm}^2$
فرکانس	$100\text{ Hz}$
سیکل کاری	$20\%$
دما	$55^{\circ}\text{C}$
pH	$4/5$
زمان	$40\text{ min}$

مراحل آماده سازی الکترولیت به شرح زیر صورت گرفت. ابتدا پودر کاربید سیلیسیم با اندازه دانه متوسط بین  $0/5\ \mu\text{m}$  الی  $5\ \mu\text{m}$  ساخت شرکت چینی شنزن ال فلو تکنولوژی (Shenzhen El flow Technologies) به  $1000\text{cc}$  آب مقطر در حال چرخش اضافه شد. در ادامه سوسپانسیون به دست آمده به مدت یک ساعت تحت چرخش به وسیله همزن مغناطیسی قرار گرفت و پس از آن به مدت یک ساعت توسط همزن آلتراسونیک هم زده شد. سپس سولفات نیکل، کلرید نیکل و اسید بوریک با مقادیر مذکور در جدول (۱) به سوسپانسیون مورد نظر اضافه گردید. جهت تهیه نمونه‌های پوشش‌دهی ابتدا ورق‌هایی از جنس مس خالص تجاری با ابعاد

که این امر باعث بهبود خواص پوشش مورد نظر خواهد شد. از پوشش‌هایی که می‌توان به وسیله آبکاری الکترولیتی تولید نمود، پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم می‌باشد. خواص هدایت الکتریکی و همچنین استحکام بالا از دلایلی می‌باشد که منجر شده است محققان زیادی بر روی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم و تأثیر پارامترهای آبکاری بر خواص تریبولوژیکی آنها، مطالعاتی انجام دهند [۵-۷]. این نکته قابل ذکر است که خواص پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم بستگی به اندازه ذرات فاز دوم و مقدار آنها دارد. در روش آبکاری الکترولیتی با جریان منقطع، خواص پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم به عواملی از قبیل دانشیه جریان اعمالی، شکل موج، ترکیب الکترولیت، غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت و شکل آنها بستگی دارد. بنابراین با تغییر هر یک از پارامترهای آبکاری می‌توان به پوششی با خواص کاملاً متفاوت دست پیدا کرد [۸-۱۵]. جیفنو (Gyftou) و همکارانش بر روی مکانیزم‌های پوشش‌دهی کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم تحقیقاتی انجام داده اند [۱۶]. اما تحقیقات جامعی بر روی تأثیر غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت بر خواص پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم انجام نشده است. در این پژوهش، رسوب‌دهی ذرات کاربید سیلیسیم در زمینه نیکل با استفاده از روش آبکاری الکترولیتی با جریان منقطع انجام گردید. سپس تأثیر غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت بر ضریب اصطکاک، مورفولوژی، جهات رشد ترجیحی بلورهای نیکل، میکروسختی و میزان کاهش وزن پوشش‌ها در آزمون سایش، مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش تحقیق

جهت انجام آزمایش از الکترولیتی با حجم  $1000\text{CC}$ ، آند نیکل و کاتد مس خالص تجاری با ابعاد  $12\text{cm} \times 12\text{cm} \times 0/2\text{ cm}$  استفاده شد. برای پوشش‌دهی از چهار بشر هر یک به حجم  $1000\text{CC}$  که غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در آنها به ترتیب ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ گرم بر لیتر بود، استفاده گردید. در حین فرآیند



شکل (۱): نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم تولید شده با غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت به میزان (الف):  $20 \text{ gr.L}^{-1}$ ، (ب):  $80 \text{ gr.L}^{-1}$ .

مطابق شکل (۱) شدت خطوط صفحات (۱۱۱) و (۳۱۱) افزایش یافته و به همراه آن میزان شدت خطوط صفحه (۲۰۰) کاهش می‌یابد. وجود ذرات کاربید سیلیسیم باعث افزایش محل‌های جوانه زنی بلورهای نیکل و در نتیجه کاهش اندازه دانه‌های آن می‌شود. با افزایش میزان غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت، میزان درصد حضور ذرات کاربید سیلیسیم در پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان این گونه بیان نمود که نحوه رشد بلورهای نیکل در حضور ذرات کاربید سیلیسیم تغییر پیدا می‌کند. این تغییرات ساختاری در بلورهای نیکل به جهت وجود یک محیط قلیایی در فصل مشترک الکترو-الکترولیت به علت جذب یون  $\text{H}^+$  در سطح ذرات کاربید سیلیسیم می‌باشد [۱۷-۱۸].

تصویر سطح مقطع پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم در شکل (۲) و (۳) نشان می‌دهد که ذرات کاربید سیلیسیم به صورت یک سری ذرات سیاه رنگ (که به وسیله پیکان نمایش داده شده اند) دارای یک توزیع یکنواخت در سرتاسر پوشش می‌باشند. مکانیزم رسوب‌دهی ذرات کاربید سیلیسیم بدین صورت می‌باشد که ذرات کاربید سیلیسیم به اطراف بلورهای نیکل متصل می‌-

شده. در ادامه جهت آماده سازی نمونه‌ها، فرآیند پولیش به ترتیب با سنباده‌های ۲۸۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ از نوع کاغذهای سنباده کاربید سیلیسیم بر روی نمونه‌ها انجام شد و پس از آن عملیات چربی زدایی در محلول سود به مدت ۴ دقیقه در دمای  $80^\circ\text{C}$  انجام گردید. پس از مراحل مذکور، نمونه‌ها در محلول اسیدسولفوریک ۱۰٪ به مدت ۲ دقیقه اسید شویی شدند و سپس با آب مقطر شستشو و در نهایت خشک گردیدند. پس از آماده سازی الکترولیت و نمونه‌ها، پوشش‌دهی مطابق جدول (۱) انجام گردید. همچنین در حین عملیات پوشش‌دهی، الکترولیت توسط همزن آلتراسونیک هم زده شد. میکروسختی پوشش‌ها از سطح مقطع آنها به وسیله دستگاه میکروسختی سنج ویکرز با وزنه ۲۰ گرم و زمان مکث ۱۰ ثانیه در سه نقطه برای هر نمونه اندازه‌گیری شد و میانگین این سه عدد به عنوان سختی هر نمونه در نظر گرفته شد. بررسی مورفولوژی پوشش‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل (فیلیپس-۵۱۵) انجام گرفت. جهات ترجیحی رشد بلورهای نیکل توسط دستگاه تفرق اشعه ایکس مدل (فیلیپ ایکس پرت-پرو (Philip Xpert-Pro)) تعیین گردید. میزان ضریب اصطکاک و رفتار سایشی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم با استفاده از روش پین بر روی صفحه (Pin-On-Plate) در حالت خشک مورد بررسی قرار گرفت. در این روش سرعت حرکت پین  $0.17 \text{ (m/s)}$ ، نیروی اعمالی  $900 \text{ gr}$ ، دمای  $25^\circ\text{C}$  و میزان رطوبت هوا ۴۰ درصد بود. ضریب اصطکاک در حین آزمون سایش اندازه‌گیری شد.

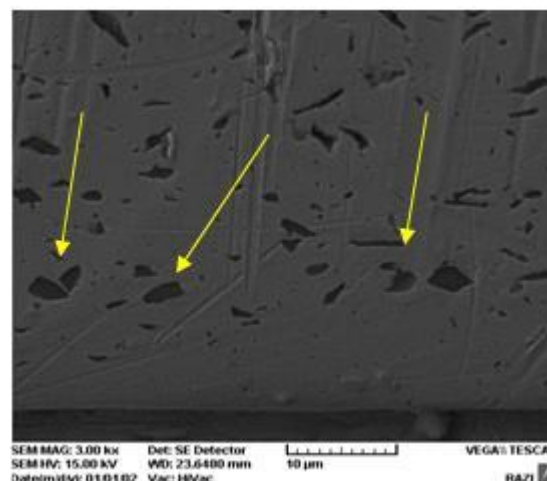
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مورفولوژی و میکروسختی

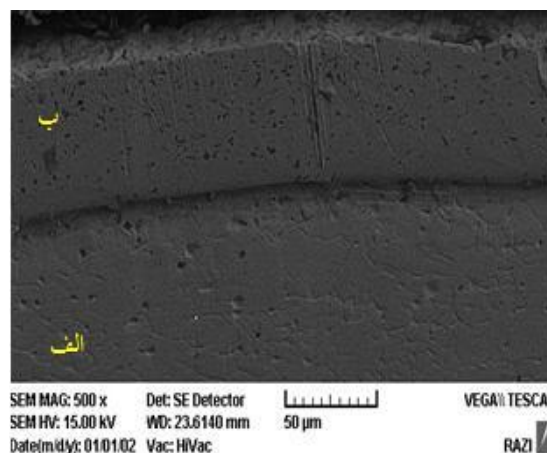
تأثیر میزان درصد ذرات کاربید سیلیسیم بر ساختار کریستالی پوشش‌ها با استفاده از دستگاه آنالیز تفرق اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

جایی ادامه می یابد که به یک ذره کاربید سیلیسیم ختم شود و لایه بعدی در اطراف همان ذره شروع به جوانه زنی و رشد می نماید. تصویر سطح پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم در شکل (۴) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد با افزایش غلظت ذرات کاربید سیلیسیم، مورفولوژی پوشش های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم تغییر می کند. از هر یک از نمونه های پوشش داده شده با غلظت های متفاوت ذرات کاربید سیلیسیم، میکروسختی در سه نقطه از سطح مقطع آنها اندازه گیری شد. میانگین این سه عدد به عنوان نتایج آزمون میکروسختی نشان می دهد که با افزایش غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت، میزان سختی پوشش های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم افزایش می یابد، که در شکل (۵) نشان داده شده است. حضور ذرات کاربید سیلیسیم در زمینه نیکل باعث کاهش اندازه دانه های بلورهای نیکل می شود که بطور قابل توجهی سختی پوشش ها را نیز افزایش می دهد [۲۰-۲۱]. سختی و خواص مکانیکی پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم وابسته به مقدار و اندازه ذرات کاربید سیلیسیم می باشد. مکانیزم های استحکام دهی توسط مقدار و اندازه ذرات به ترتیب به نام های استحکام دهی توزیع (Dispersion- Strengthening) و استحکام دهی ذرات (Particle- Strengthening) نامیده می شوند. مکانیزم استحکام دهی توزیع ذرات بدین صورت می باشد که ذرات کاربید سیلیسیم که به صورت یکنواخت در سرتاسر زمینه نیکل پراکنده شده و مانع از حرکت نابجایی ها می شوند. مکانیزم استحکام دهی ذرات بدین صورت می باشد که بارهای اعمالی به پوشش کامپوزیتی هم توسط زمینه و هم ذرات کاربید سیلیسیم مهار می شود و در واقع ذرات سخت کاربید سیلیسیم که به صورت یکنواخت در زمینه نیکل توزیع شده اند، از تغییر فرم زمینه جلوگیری می کنند [۲۲-۲۴].

شوند و به همراه آنان رسوب می کنند، در واقع میان بلور ها به دام می افتند، بنابراین مکانیزم رسوب-دهی، بین بلوری می-باشد [۱۹].

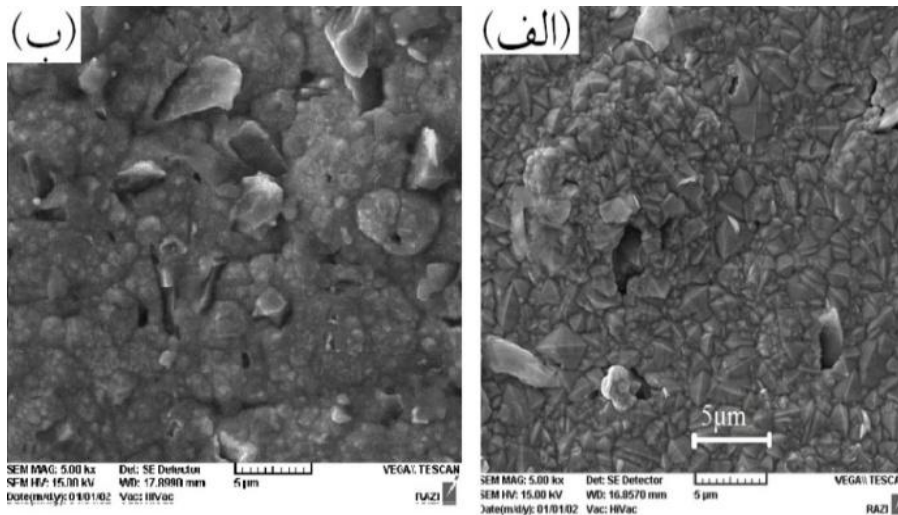


شکل (۲): تصویر سطح مقطع پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم.

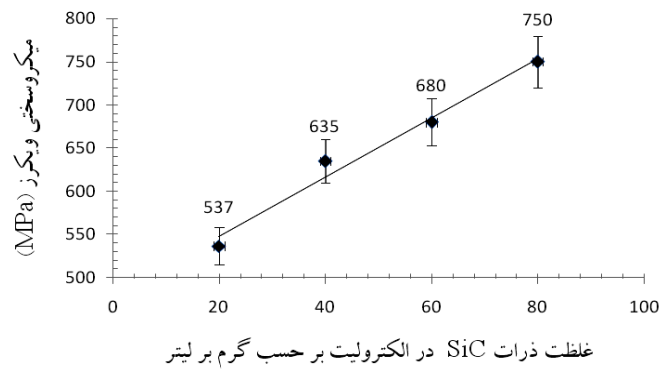


شکل (۳): (الف): تصویر سطح مقطع زیر لایه مس (لایه زیرین)، (ب): پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم (لایه روی)

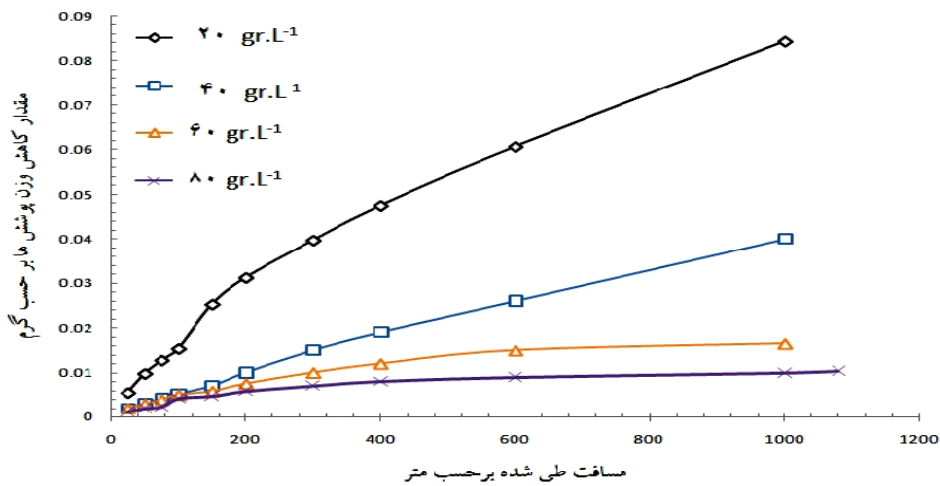
به طور کلی ساختار میکروسکوپی پوشش های تولید شده به روش آبرکاری الکترولیتی به صورت دانه های ستونی می باشد که قطر آنها با افزایش ضخامت پوشش، افزایش می یابد. حضور ذرات کاربید سیلیسیم در زمینه نیکل باعث تغییر ساختار دانه های ستونی به هم محور و همچنین باعث کاهش اندازه بلورهای نیکل می شود. رشد بلورهای نیکل به هنگام عملیات پوشش دهی، تا



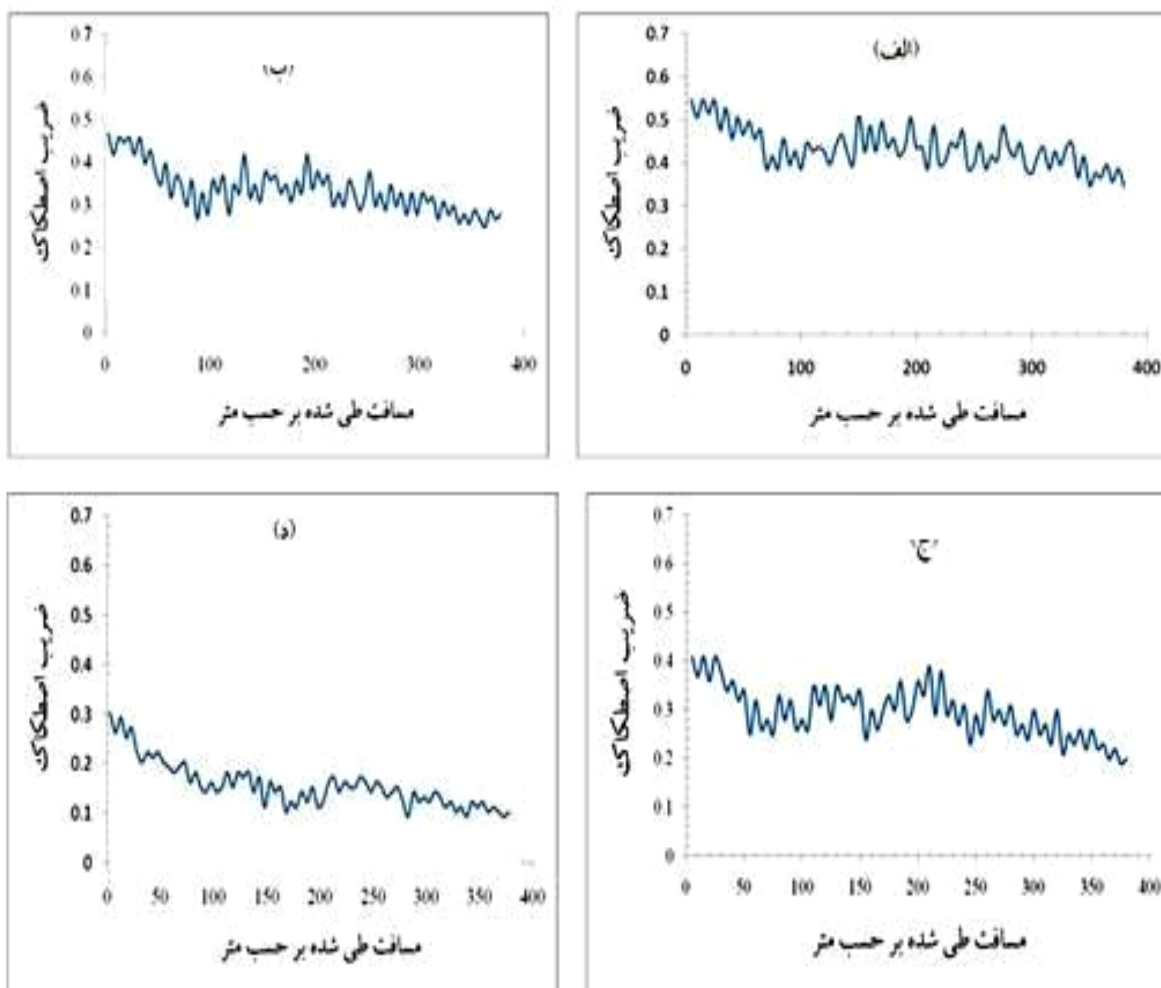
شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم تولید شده با غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت به میزان (الف):  $20 \text{ gr.L}^{-1}$ ، (ب):  $80 \text{ gr.L}^{-1}$ .



شکل (۵): نمودار تغییرات میکروسختی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم بر حسب تغییرات غلظت ذرات کاربید سیلیسیم در الکترولیت.



شکل (۶): نمودار تغییرات کاهش وزن پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم بر حسب مسافت طی شده



شکل (۷): تغییرات ضریب اصطکاک در حین آزمون سایش بر حسب فاصله طی شده برای پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم تولید شده با غلظت‌های مختلف ذرات کاربید سیلیسیم به میزان (الف):  $20 \text{ (gr.L}^{-1}\text{)}$ ، (ب):  $40 \text{ (gr.L}^{-1}\text{)}$ ، (ج):  $60 \text{ (gr.L}^{-1}\text{)}$ ، (د):  $80 \text{ (gr.L}^{-1}\text{)}$  در حمام وات.

### ۳-۲- رفتار سایشی

درصد حضور ذرات کاربید سیلیسیم به عنوان یک فاز بسیار سخت و مقاوم به سایش، میزان کاهش وزن پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم بصورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و مقاومت سایشی آنها افزایش می‌یابد. حضور ذرات کاربید سیلیسیم منجر به تقویت بافت مقاوم (۱۱۱) می‌شود و این عامل هم می‌تواند به نوعی منجر به افزایش نسبی مقاومت به سایش پوشش‌ها شود. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، در مراحل اولیه آزمون سایش (بطور متوسط تا مسافت ۵۰۰ متر) به دلیل جدا شدن مقداری از ذرات کاربید

برای هریک از پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم که با غلظت‌های مختلف ذرات کاربید سیلیسیم در حمام وات پوشش داده شد، آزمون سایش با روش روش پین بر روی صفحه (Pin-On-Plate) با بار اعمالی ۹۰۰ گرم، سرعت پین به میزان  $0.17 \text{ (m/s)}$ ، دمای  $25^\circ\text{C}$  و درصد رطوبت هوا به میزان ۴۰٪ انجام شد. شکل (۶) میزان تغییرات کاهش وزن پوشش‌ها را بر حسب مسافت طی شده نشان می‌دهد. با افزایش غلظت کاربید سیلیسیم در الکترولیت، میزان درصد حضور آنها در زمینه نیکل افزایش می‌یابد و در نتیجه به دلیل افزایش میزان

نیکل-کاربید سیلیسیم با افزایش میزان غلظت ذرات کاربرد سیلیسیم در الکترولیت، کاهش می‌یابد و همچنین مقدار آن در حین آزمون سایش تغییرات کمتری از خود نشان می‌دهد.

۴- پوشش‌های به دست آمده با جریان منقطع در مقایسه با جریان مستقیم دارای دانسیته بالاتر، وجود تخلخل کمتر و سختی بیشتری هستند. همچنین استفاده از جریان منقطع باعث ریز دانه شدن ساختار، توزیع یکنواخت پوشش می‌شود.

#### ۵- مراجع

- [1] E. Aghaie, A. Najafi, H. Maleki-Ghaleh & H. Mohebi, "Effect of SiC concentration in electrolyte on Ni-SiC composite coating properties", *Surface Engineering*, Vol. 29, pp. 177-182, 2013.
- [2] B.R. Tian, Y.F. Cheng, "Cheng, Electrolytic deposition of Ni-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating on pipe steel for corrosion/erosion resistance in oil sand slurry", *Electrochim Acta*, Vol. 53, pp. 511-517, 2007.
- [3] Q. Li, X. Yang, L. Zhang, J. Wang & B. Chen, "Corrosion resistance of electroless Cu-P and Cu-P-SiC composite coatings in 3.5% NaCl", *Alloys Compound*, Vol. 482, pp. 339-344, 2009.
- [4] S. Zhang, K. Han & L. Cheng, "Microstructure and magnetic properties of SiC/Co composite particles prepared by electroless plating", *Surface Coating Technology*, Vol. 202, pp. 2807-2812, 2008.
- [5] G. Jiaqiang, L. Lei, W. Yating, S. Bin, H. Wenbin, "Effect of SiC on the corrosion resistance of electroless Cu-P-SiC composite coating", *Surface Coating Technology*, Vol. 200, pp. 5836-5842, 2006.
- [6] J.T. Jiang, L. Zhen, C.Y. Xu & X.L. Wu, "Microstructure and magnetic properties of SiC/Co composite particles prepared by electroless plating", *Surface and Coating Technology*, Vol. 201, pp. 3139-3146, 2006.
- [7] H.F. Zhao, W.Z. Tang, C.M. Li, G.C. Chen, F.X. Lu, Y.H. Cai, H. Guo, R.Q. Zhang & P.W. Zhang, "Thermal conductive properties of Ni-P electroless plated SiC<sub>p</sub>/Al composite electronic packaging material" *Surface and Coating Technology*, Vol. 202, pp. 2540-2544, 2008.

سیلیسیم که در سطح پوشش که به صورت دندانه دندانه می‌باشند، شاهد تشدید میزان سایش و کاهش وزن قابل ملاحظه‌ای هستیم. پس از این مرحله یعنی تقریباً از مسافت ۶۰۰ متر به بعد، دلیل از بین رفتن دندانه‌های موجود در سطوح پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم و خروج ذرات کاربرد سیلیسیم از منطقه سایش که از مرحله قبل بوجود آمده بود، میزان نرخ کاهش وزن پوشش‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱۷]. شکل (۷) تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به فاصله طی شده در حین آزمون سایش را برای پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم با غلظت‌های مختلف ذرات کاربرد سیلیسیم در الکترولیت، نشان می‌دهد. با افزایش غلظت ذرات کاربرد سیلیسیم در الکترولیت که باعث افزایش میزان درصد حضور ذرات کاربرد سیلیسیم در زمینه نیکل می‌شود، میزان ضریب اصطکاک پوشش‌ها کاهش می‌یابد و همچنین پایداری شده و تغییرات کمتری از خود نشان می‌دهد.

#### ۴- نتیجه گیری

۱- حضور ذرات کاربرد سیلیسیم در زمینه نیکل به وسیله آزمون تفرق اشعه ایکس اثبات گردید. همچنین ذرات کاربرد سیلیسیم باعث تغییر در الگوی رشد صفحات نیکل و تقویت بافت سخت (۱۱۱) می‌شوند که این امر باعث افزایش سختی و مقاومت سایشی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم می‌شود.

۲- با افزایش غلظت ذرات کاربرد سیلیسیم در الکترولیت، میزان درصد حضور ذرات کاربرد سیلیسیم در پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم، میزان مقاومت سایشی و میکروسختی پوشش‌های کامپوزیتی افزایش می‌یابد همچنین افزایش غلظت ذرات کاربرد سیلیسیم در الکترولیت منجر به تغییر مورفولوژی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-کاربید می‌گردد.

۳- توزیع یکنواخت ذرات کاربرد سیلیسیم و افزایش میزان درصد حضور آنها در پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید سیلیسیم، مقدار کاهش وزن پوشش‌ها را در حین آزمون سایش، به شدت کاهش می‌دهد. ضریب اصطکاک پوشش‌های کامپوزیتی



- electrodeposit", *Materials Chemistry Physics*, Vol. 100, pp. 395-399, 2006.
- [17] Q.Feng, T.Li, H.Yue, K.Qi, F.Bai & J.Jin, "Tribological behavior of SiC particle-reinforced copper matrix composites", *Surface and Science*, Vol. 254, pp. 2262-2268, 2008.
- [18] M. Srivastava, V.K. William Grips & K.S. Rajam, "Effect of reinforcing submicron SiC particles on the wear of electrolytic NiP coatings", *Surface and Science*, Vol. 253, pp. 3814-3824, 2007.
- [19] C.T.J. Low, R.G.A. Wills & F.C. Walsh, "Electrodeposition of composite coatings containing nanoparticles in a metal deposit" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 371-383, 2006.
- [20] Z. Karathanasis, E. A. Pavlatou & N. Spyrellis, "Pulse electrodeposition of Ni-P matrix composite coatings reinforced by SiC particles", *Alloys and Compounds*, Vol. 494, pp. 396-403, 2010.
- [21] Z. Xia, F. He, W. Wei, Z. Zhao, J. Qing & C. Nanf, "Electrodeposition of Ni-SiC nano-composite film", *Trans. Nonferrous Met*, Vol. 17, pp. 9-15, 2007.
- [22] Li Chen, L. Wang, Z. Zeng & T. Xu, "Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 599-605, 2006.
- [23] Y. Li, H. Jiang, L. Pang, B. Wang & X. Liang, "Novel application of nanocrystalline nickel electrodeposit: Making good diamond tools easily, efficiently and economically", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 5925-5930, 2007.
- [24] E. Garc-Lecinaa, I. Garc-Urrutia, J.M.Salvo, F.Smeacetto, G. Gautier, R. Seddond & R. Martind, "Electrochemical deposition of nickel/SiC composites in the presence of surfactants", *Electrochimica Acta.*, Vol. 54, pp. 2556-2562, 2006.
- [8] K.H. Hou, M.D. Ger, L.M. Wang & S.T. Ke, "The wear behaviour of electro-codeposited Ni-SiC composites", *Wear*, Vol. 253, pp. 994-1003, 2002.
- [9] Sh. C. Wang, W. Cheng & J. Wei, "Characterization of Electroplated Ni/SiC and Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings Bearing Nanoparticles", *Materials Research Society*, Vol. 18, pp. 1566-1574, 2003.
- [10] L. Benea, P.L. Bonora & A. Borello, "Tribocorrosion behavior of Ni-SiC nano-structured composite coatings obtained by electrodeposition", *Solid State Ionics.*, Vol. 151, pp. 89-95, 2002.
- [11] F. Sansoz, K.D. Stevenson, R. Govinthasamy & N.S. Murthy, "Making the surface of nanocrystalline Ni on an Si substrate ultrasmooth by direct electrodeposition", *Scripta Materialia*, Vol. 59, pp. 103-106, 2008.
- [12] H.L. Seet, X.P. Li, W.C. Ng, H.Y. Chia, H.M. Zheng & K.S. Lee, "Development of Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/Cu nanocrystalline composite wires by pulse-reverse electrodeposition", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 449, pp. 279-283, 2008.
- [13] E. Setare, K. Raeissi, M. A. Golozar & M. H. Fathi, "The structure and corrosion barrier performance of nanocrystalline zirconia electrodeposited coating", *Corrosion Science*, Vol. 51, pp. 1802-1808, 2009.
- [14] Z. Karathanasis, E.A. Pavlatou & N. Spyrellis, "Pulse electrodeposition of Ni-P matrix composite coatings reinforced by SiC particles", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 494, pp. 396-403, 2010.
- [15] Ranjith, G. P. Kalaigan, "Ni-Co-TiO<sub>2</sub> nanocomposite coating prepared by pulse and pulse reversal methods using acetate bath", *Applied Surface Science*, Vol. 257, pp. 42-47, 2010.
- [16] L.M. Changa, M.Z. Ana & S.Y. Shi, "Microstructure and characterization of Ni-Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings by pulse reversal