

## بررسی رفتار تریبولوژیکی پوشش کامپوزیتی Ni-P-SiC ایجاد شده روی آلیاژ آلومینیم Al6061 به روش آبکاری شیمیایی<sup>۱</sup>

رضا سلیمانی گیلاکجانی\*<sup>۲</sup>، فرزاد محبوبی<sup>۳</sup>، مریم کاظمی<sup>۴</sup>

### چکیده

ذرات کاربید سیلیسیوم (SiC) با استحکام مکانیکی بسیار بالا، به عنوان موادی مناسب جهت ساخت پوشش‌های کامپوزیتی با سختی و مقاومت به سایش بالا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش پوشش کامپوزیتی Ni-P-SiC به روش آبکاری شیمیایی روی زمینه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیم Al6061 رسوب داده شد. سختی پوشش‌های حاصل در دو حالت، پوشش کامپوزیتی به همراه نانوذرات کاربید سیلیسیوم و پوشش نیکل-فسفر معمولی، مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه‌یابی پوشش‌ها به کمک طیف‌نگاری تفکیک انرژی (EDS) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام گرفت. رفتار سایشی پوشش‌ها با آزمون پین روی دیسک مورد ارزیابی قرار گرفت و ضریب اصطکاک پوشش‌ها نیز گزارش شدند. برای بررسی زبری سطح پوشش‌ها از آزمون زبری سنجی استفاده شد. نتایج نشان داد که مشارکت نانوذرات کاربید سیلیسیوم در پوشش کامپوزیتی، سبب افزایش سختی، مقاومت سایشی پوشش و ضریب اصطکاک آنها شده است. بهبود رفتار تریبولوژیکی پوشش کامپوزیتی Ni-P-SiC را می‌توان به استحکام مکانیکی منحصر به فرد کاربید سیلیسیوم نسبت داد.

**واژه‌های کلیدی:** نانوذرات کاربید سیلیسیوم، پوشش کامپوزیتی، آبکاری شیمیایی، سایش، ضریب اصطکاک

<sup>۱</sup>- Electroless

<sup>۲</sup>- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، تهران

<sup>۳</sup>- دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، تهران

<sup>۴</sup>- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، تهران

\*- نویسنده مسئول مقاله: rezasolemani@aut.ac.ir

## پیشگفتار

سبکی و نسبت استحکام به وزن بالای آلیاژهای آلومینیم و هم‌چنین خواص دیگر آن از جمله مقاومت به خوردگی خوب این آلیاژها باعث کاربرد بسیار آنها در صنایع مختلف شده است [۱ و ۲]. اما محدودیت‌هایی در استفاده از آنها وجود دارد که در این رابطه می‌توان نرمی و مقاومت سایشی پائین آنها را نام برد. یکی از روش‌های غلبه بر این محدودیت‌ها، ایجاد پوشش آبرکاری شیمیایی نیکل - فسفر روی این آلیاژها است [۲].

روش پوشش‌دهی آبرکاری شیمیایی به طور گسترده برای پوشش‌های کامپوزیتی پایه نیکل به کار برده می‌شود. در این روش رسوب فلز به وسیله احیاء یون‌های فلزی موجود در حمام توسط عامل احیاء کننده و بدون اعمال جریان خارجی انجام می‌شود. این پوشش به دلیل فرایند ساخت و ترکیب منحصر به فردش دارای ضخامتی یکنواخت و خواصی نظیر مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت سایشی عالی و خواص غیر مغناطیسی است [۳ و ۴]. پوشش‌های تجاری کامپوزیتی آبرکاری شیمیایی به وسیله افزودن ذرات میکرومتری از قبیل  $\text{SiC}$ ،  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ،  $\text{BN}$ ،  $\text{Graphite}$ ،  $\text{PTFE}$ ،  $\text{MnS}_2$  و الماس به حمام آبرکاری شیمیایی تهیه می‌گردند. اما با توسعه و پیشرفت تکنولوژی، پوشش‌های کامپوزیتی میکرومتری نمی‌توانند نیاز کاربردهایشان را برآورده کنند، لذا پوشش‌های آبرکاری شیمیایی کامپوزیتی با ذرات نانومتری به دلیل کارایی بالایشان از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۵ و ۶].

کاربرد سیلیسیوم یک ماده سرامیکی نسبتاً ارزان است که دارای پایداری شیمیایی، مقاومت به سایش و فرسایش بالا است [۵] که این خواص سبب توسعه استفاده از آن در کامپوزیت‌ها و پوشش‌های کامپوزیتی شده است. تحقیقات صورت گرفته بر روی پوشش‌های کامپوزیتی با ذرات تقویت‌کننده  $\text{SiC}$  نشان داده است که حضور ذرات  $\text{SiC}$  در این پوشش‌ها سبب افزایش سختی و بهبود خواص سایشی پوشش‌ها شده است [۷ و ۸]. بررسی بیش‌تر در این زمینه نشان می‌دهد که پارامترهای دیگری نظیر اندازه و غلظت ذرات تقویت‌کننده، نوع و غلظت فعال‌کننده سطح مورد استفاده، سرعت هم‌زدن و غیره به شدت در رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های کامپوزیتی موثر است [۸ و ۹].

تحقیقات بسیاری در زمینه خواص تریبولوژیکی پوشش‌های کامپوزیتی آبرکاری شیمیایی انجام شده است، اما با این وجود، اطلاعات کافی در مورد تاثیر نانوذرات بر خواص تریبولوژیکی پوشش‌های آبرکاری شیمیایی وجود ندارد. در این تحقیق با استفاده از نانوذرات  $\text{SiC}$ ، پوشش کامپوزیتی Ni-P-SiC ساخته شده و نقش نانوذرات کاربرد سیلیسیوم در بهبود رفتار تریبولوژیکی پوشش‌ها بررسی شده است.

## مواد و روش تحقیق

این تحقیق روی نمونه آلومینیومی آلیاژ Al6061 به عنوان زیر لایه انجام شد. مراحل آماده سازی زیرلایه قبل از آبرکاری عبارتند از: پولیش با کاغذ سنباده  $\text{SiC}$  تا درجه ۳۰۰۰، شستشو با استون به مدت ۱۰ ثانیه، شستشو در محلول اسیدی حاوی نیتریک اسید ۶۵٪ وزنی ساخت شرکت مرک آلمان و فلوئوریک اسید تجاری، به ترتیب با نسبت ۳ به ۱، به مدت ۱۰ ثانیه، غوطه‌وری در حمام زینکاته به مدت ۳۰ ثانیه (زینکاته مرتبه اول)، شستشو با نیتریک اسید ۵٪ به مدت ۱۰ ثانیه، غوطه‌وری در حمام زینکاته به مدت ۳۰ ثانیه (زینکاته مرتبه دوم)، شستشو با آب مقطر دی‌یونیزه شده و در دمای اتاق ( $25 \pm 5^\circ\text{C}$ ). ترکیب حمام زینکاته در جدول شماره ۱ ذکر شده است. عملیات زینکاته کردن به منظور حذف فیلم اکسیدی تشکیل شده پس از اسید شویی و جلوگیری از اکسیداسیون مجدد و ایجاد سطح کاتالیتیکی، که برای آبرکاری شیمیایی نیکل ضروری است، انجام می‌گیرد. حمام مورد استفاده برای ایجاد پوشش‌های آبرکاری شیمیایی، شامل  $40\text{g/l}$  سولفات نیکل،  $20\text{g/l}$  هیپوفسفیت سدیم،  $10\text{g/l}$  سیترات سدیم و  $15\text{g/l}$   $\text{SiC}$ ، که اندازه متوسط ذرات  $\text{SiC}$ ، ۴۰ نانومتر، می‌باشد. شرایط انجام فرایند آبرکاری، در جدول شماره ۲ آورده شده است. فرایند پوشش‌دهی به مدت دو ساعت انجام شد. پوشش‌ها در دو حالت کامپوزیتی به همراه نانوذرات کاربرد سیلیسیوم و آبرکاری شیمیایی معمولی Ni-P، بر روی سطح رسوب داده شدند.

جدول ۱- اجزا تشکیل دهنده حمام زینکاته

۸۸-۸۵°C	دما
۴/۶-۴/۹	pH
۱۶۰ rpm	سرعت هم زدن (مگنت)
۵۰ mg/lit	فعال ساز سطح (cetyl-trimethylamine bromide)
۱۵ g/lit	SiC

جدول ۲- شرایط حمام آبکاری شیمیایی برای فرایند پوشش دهی نیکل

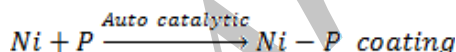
نام ماده شیمیایی	ترکیب شیمیایی	مقدار (g/lit)
هیدروکسید سدیم	NaOH	۱۰۶
سولفات نیکل	Ni(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	۳۰
سولفات مس	CuSO <sub>4</sub>	۵
پتاسیم هیدروژن تارتارات	KHC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	۴۰
کلرید آهن	FeCl <sub>2</sub>	۲
سولفات روی	ZnSO <sub>4</sub>	۴۰
سیانید پتاسیم	KCN	۱۰

## نتایج و بحث

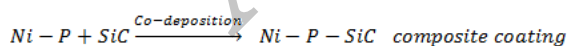
### مشخصه‌یابی پوشش‌های Ni-P و Ni-P-SiC

پس از اینکه آلومینیم توسط فرایند زینکاته کردن، برای پوشش‌دهی، آماده گردید، پوشش به صورت اتوکاتالیتیکی<sup>۱</sup> و بدون نیاز به جریان خارجی رسوب کرده و ذرات SiC معلق در حمام، درون پوشش محبوس می‌گردند. فرایند این نوع پوشش‌دهی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

(۱)



(۲)



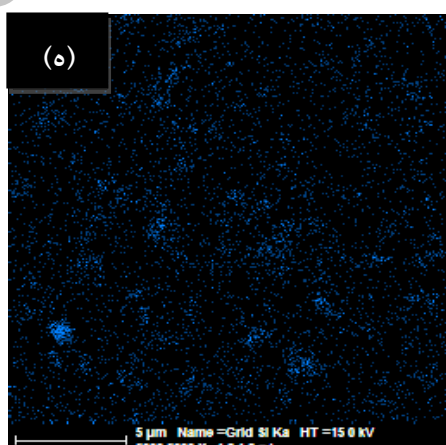
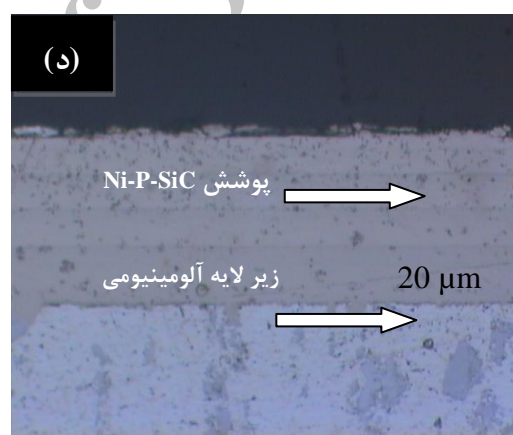
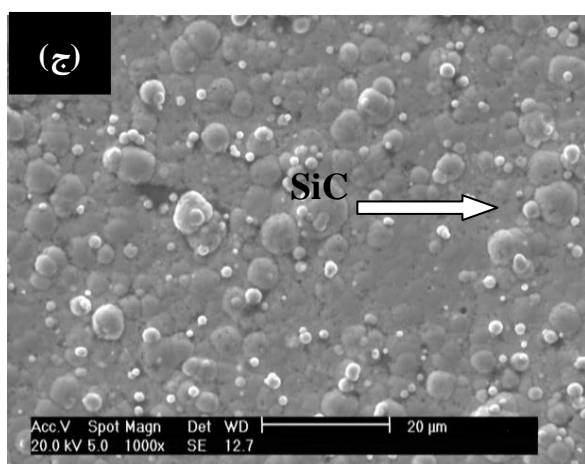
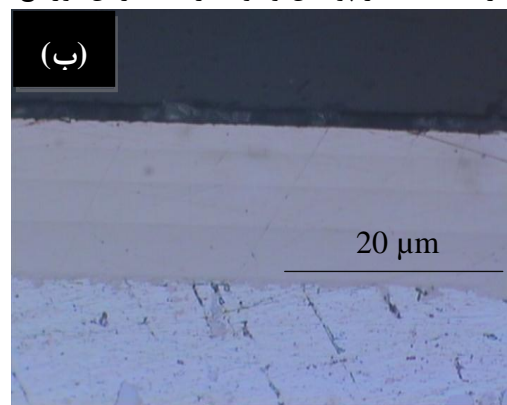
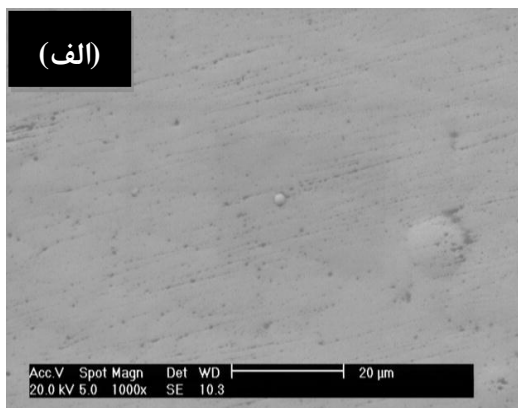
در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نوری از مورفولوژی سطح و مقطع عرضی پوشش‌های Ni-P و P-SiC را نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت کامپوزیتی و غیر کامپوزیتی پوشش‌هایی بدون ترک و یکنواخت را شاهد

سختی پوشش‌ها توسط دستگاه میکروسختی سنج Koopa Pazhoohesh، با بار اعمالی ۵۰ گرم و زمان ۵ ثانیه اندازه‌گیری شد. سختی هر پوشش، در سه نقطه اندازه‌گیری و میانگین آنها گزارش شد. آزمون سایش و اصطکاک به روش پین روی دیسک در بار اعمالی ۸ نیوتن، سرعت خطی سایش ۰/۰۵ m/s و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه‌های دارای پوشش کامپوزیتی، آبکاری شیمیایی معمولی Ni-P و آلومنیوم بدون پوشش در مسافت ۲۰۰ متر انجام شد. نمودار کاهش وزن-مسافت برای هر نمونه رسم شد و میانگین ضریب اصطکاک آنها گزارش شد. سطح سایش نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت. از میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips مدل XL30 برای مطالعه مورفولوژی پوشش و از آنالیز EDS جهت تعیین ترکیب شیمیایی و از میکروسکوپ نوری Olympus مدل Bh2 برای بررسی توزیع ذرات در شبکه نیکل استفاده شد.

<sup>۱</sup>- Auto-catalytic

اتم‌های Si، بیانگر توزیع ذرات SiC در پوشش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات SiC توزیع نسبتاً یکنواختی در پوشش دارند.

هستیم که این امر در رفتار تریبولوژیکی پوشش‌ها تأثیر بسزایی دارد. ضخامت پوشش‌ها حدود ۲۵ میکرومتر است. شکل ۱-ه نقشه توزیع EDS عنصر Si در پوشش کامپوزیتی را نشان می‌دهد، از آنجا که اتم‌های Si به صورت ترکیب SiC در پوشش وجود دارند، بنابراین توزیع

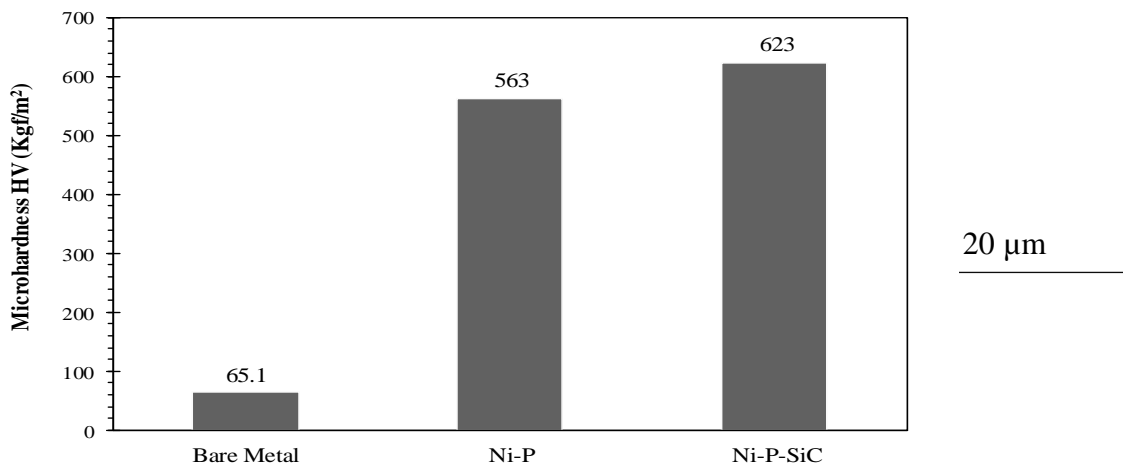


شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری و SEM از مورفولوژی سطح و مقطع عرضی پوشش  
الف و ب) Ni-P، ج و د) Ni-P-SiC؛ ه) نقشه EDS پراکندگی نانوذرات SiC در سطح پوشش

## مطالعات سختی سنجی

یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

سختی پوشش‌های Ni-P و Ni-P-SiC و آلومینیوم بدون پوشش توسط یک نمودار ستونی در شکل ۲ با



شکل ۲- نمودار ستونی نتایج میکروسختی سنجی پوشش‌های Ni-P، Ni-P-SiC و آلومینیوم بدون پوشش

$$W_r = \frac{\Delta m}{(\rho \times l \times F)} \quad (3)$$

رفتار سایشی پوشش کامپوزیتی Ni-P-SiC به شدت به ریزساختار آن وابسته است. ذرات SiC پراکنده در زمینه نیکل، از حرکت نابجایی‌ها ممانعت به عمل آورده یا حداقل باعث کند شدن حرکت آنها می‌شوند و بدین‌وسیله مانع از تغییر شکل پلاستیک در طی سایش می‌شوند. مطالعه رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های کامپوزیتی Ni-P-SiC نشان می‌دهد که نه تنها حجم ذرات SiC رسوب داده شده در شبکه پوشش، بلکه تعداد آنها در واحد سطح پوشش و اندازه آنها نیز بر روی رفتار تریبولوژیکی پوشش Ni-P-SiC تاثیر دارد [۱۲].

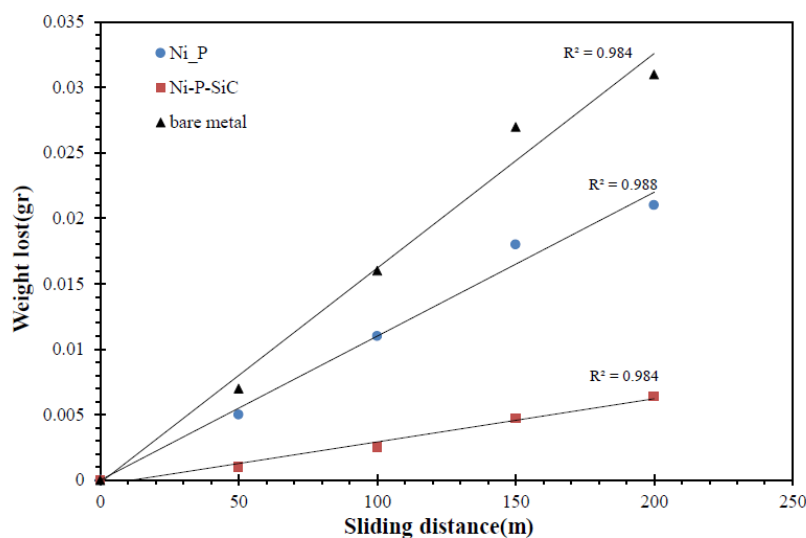
شکل ۴ نمودار ضریب اصطکاک- مسافت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ می‌توان دریافت که نانوذرات SiC، ضریب اصطکاک را از  $\mu=0/65$  برای پوشش Ni-P، به  $\mu=0/81$  برای پوشش Ni-P-SiC می‌رساند. که این افزایش ضریب اصطکاک ناشی از هندسه ظاهری و ماهیت سخت ذرات SiC و تاثیر آن بر زبری و مورفولوژی سطحی پوشش کامپوزیتی است. نتایج زبری سنجی، زبری سطحی پوشش کامپوزیتی را حدود  $0/046$  میکرومتر نشان

مشارکت نانوذرات SiC در پوشش Ni-P، سختی پوشش را از  $563$  ویکرز به  $623$  ویکرز افزایش می‌دهد. این افزایش سختی را می‌توان سختی بالای نانوذرات SiC و همچنین نقش آنها در استحکام بخشی زمینه فلزی نسبت داد [۱۰ و ۱۱].

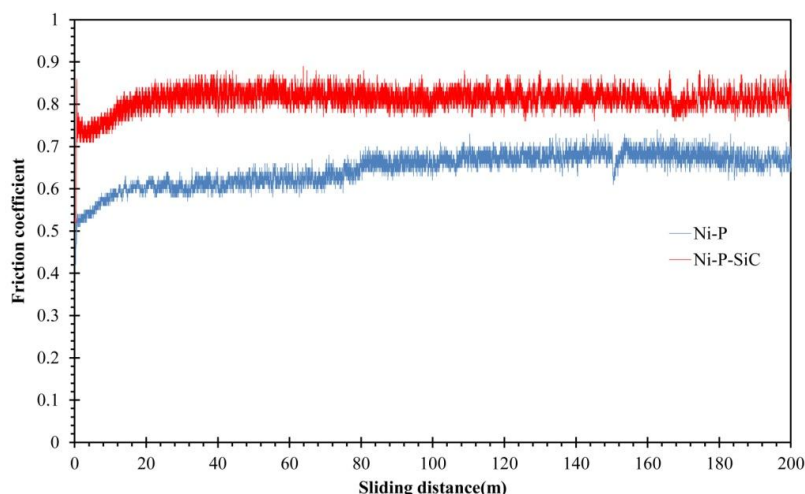
## مطالعات تریبولوژیکی

شکل ۳ نمودار کاهش وزن- مسافت را برای پوشش‌های Ni-P و Ni-P-SiC و آلومینیوم بدون پوشش، در شرایط بار اعمالی ۸ نیوتن و سرعت  $0/05$  m/s و مسافت ۲۰۰ متر نشان می‌دهد. محاسبه نرخ کاهش وزن با استفاده از رابطه شماره ۳ نشان داد که پس از مسافت ۲۰۰ متر نرخ کاهش وزن  $1/5 \times 10^{-3}$  و  $4/9 \times 10^{-4}$  (mm<sup>3</sup>/nm) به ترتیب برای پوشش‌های Ni-P و Ni-P-SiC است. در این رابطه  $W_r$  نرخ سایش بر حسب  $(\text{mm}^3/\text{nm})$ ،  $\Delta m$  کاهش وزن بر حسب میلی‌گرم،  $\rho$  چگالی بر حسب  $(\text{g}/\text{cm}^3)$ ،  $l$  مسافت طی شده بر حسب متر و  $F$  نیروی اعمالی بر حسب نیوتن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حضور نانوذرات SiC در شبکه نیکل سبب کاهش نرخ کاهش وزن در پوشش کامپوزیتی در مقایسه با پوشش Ni-P شده است.

می‌دهد در حالی که این مقدار برای پوشش غیر کامپوزیتی حدود ۰/۰۲ میکرومتر است.



شکل ۳- منحنی کاهش وزن پوشش Ni-P و Ni-P-SiC در طی آزمون سایش

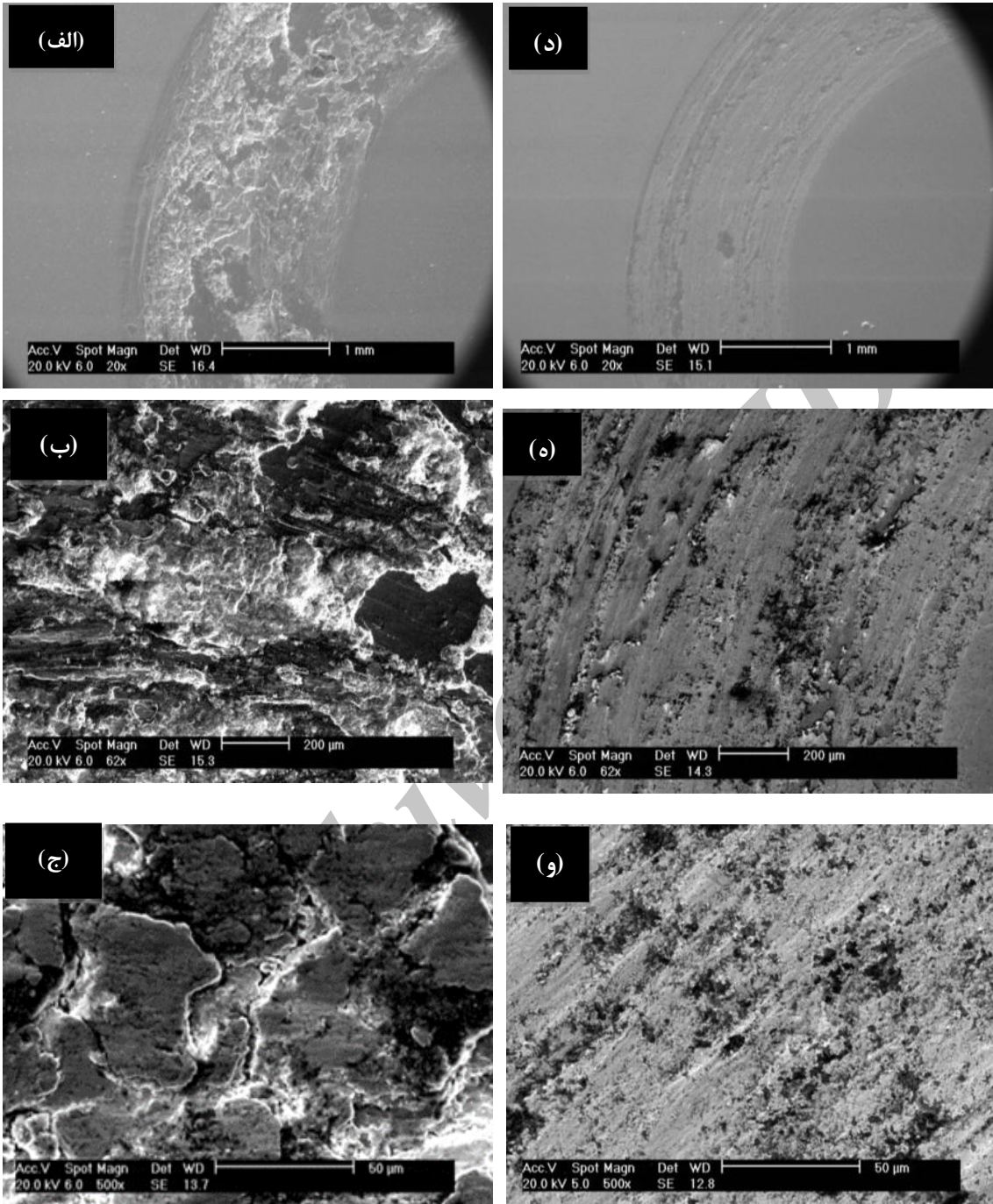


شکل ۴- منحنی ضریب اصطکاک پوشش Ni-P و Ni-P-SiC در طی آزمون سایش

همکاران [۱۲] بهبود رفتار تریبولوژیکی پوشش کامپوزیتی را به خواص مکانیکی منحصر به فرد نانوذرات SiC و تاثیر آن بر مورفولوژی سطح پوشش نسبت داده‌اند. آنها بر این باورند که ذرات SiC موجود در پوشش کامپوزیتی، با ایجاد فاصله، از تماس سخت و خشن سطح نیکل و پین در طی سایش جلوگیری کرده و نرخ سایش را کاهش می‌دهند

شکل ۵ تصویر SEM سطح سایش دو پوشش Ni-P و Ni-P-SiC را نشان می‌دهد. در شکل ۵- (الف، ب، ج)، شاهد کنده شدن پوشش Ni-P از روی سطح هستیم که بیانگر این مطلب است که مکانیزم سایش در این پوشش، سایش چسبان است. شکل ۵- (د، ه، و) نشان می‌دهد که حجم سایش پوشش کامپوزیتی به مراتب کمتر بوده و مقاومت سایشی به شدت افزایش یافته است. ملفاتی<sup>۱</sup> و

<sup>۱</sup>- Malfatti



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش الف، ب، ج (Ni-P، د، ه، و) Ni-P-SiC

## نتیجه گیری

- (۱) پوشش کامپوزیتی Ni-P-SiC از نانوذرات SiC در یک محلول آبکاری شیمیایی همگن، با موفقیت روی زمینه آلومینیومی رسوب داده شد.
- (۲) مشارکت نانوذرات SiC در پوشش سبب تقویت زمینه و افزایش سختی گردید.
- (۳) پوشش Ni-P-SiC نسبت به پوشش Ni-P دارای مقاومت سایش بالاتر و نرخ کاهش وزن کمتر ولی ضریب اصطکاک بیش تر است.
- (۴) نانوذرات SiC موجود در سطح پوشش کامپوزیتی، از یک سو، با افزایش زبری سطح سبب افزایش ضریب اصطکاک و از سوی دیگر، به دلیل سختی و استحکام بالای خود و ایجاد فاصله، از تماس سخت و خشن سطح پوشش نیکل و پین جلوگیری کرده و سبب کاهش نرخ کاهش وزن می شود.
- Reference**
- 1- Vishal Saxena, R. Uma Rani, and A.K. Sharma, "Studies on ultra high solar absorber black electroless nickel coatings on aluminum alloys for space application", *Surface & Coatings Technology* 201, pp. 855-862, 2006.
  - 2- Hu Yong-jun, Xiong Ling, and Meng Ji-long, "Electron microscopic study on interfacial characterization of electroless Ni-W-P plating on aluminium alloy", *Applied Surface Science* 253, 5029-5034, 2007.
  - 3- W. Riedel, *Electroless Nickel Plating*, ASM International, Ohio, 1991.
  - 4- G.O. Mallory and J.B. Hajdu, *Electroless Plating-Fundamentals and Applications*, reprint ed. AESF, New York, 2002.
  - 5- Z. Yang, H. Xu, Y.L. Shi, M.K. Li, Y. Huang, H.L. Li, "The fabrication and corrosion behavior of electroless Ni-P-carbon nanotube composite coatings", *Materials Research Bulletin*, 40, 1001-1009, 2005.
- 6- C.S. Chen, X.H. Chen, ZhiYang, W.H. Li, L.S. Xu, and B. Yi, "Effect of multi-walled carbon nanotubes as reinforced fibres on tribological behaviour of Ni P electroless coatings", *Diamond & Related Materials*, 15, 151-156, 2006.
  - 7- Gao Jiaqiang , Liu Lei, Wu Yating, Shen Bin, and Hu Wenbin, " Electroless Ni-P-SiC composite coatings with superfine particles ", *Surface & Coatings Technology*, 200, 5836-5842, 2006.
  - 8- M. Uysal, R. Karslioğlu, A. Alp, and H. Akbulut, "Nanostructured core-shell Ni deposition on SiC particles by alkaline electroless coating", *Applied Surface Science*, 257, 2011.
  - 9- R. K. Duchaniya, Ashok Sharma And M. K. Totalani, "Characterization Studies of Electroless Ni-P-SiC Coating on Aluminium", *ICMPAE*, pp. 240-242, 2011.
  - 10- Gao Jiaqiang , Liu Lei, Wu Yating, Shen Bin, and Hu Wenbin, "Electroless Ni-P-SiC composite coatings with superfine particles", *Surface & Coatings Technology*, Vol.200, pp. 5836-5842, 2006.
- ۱۱- سارا پولادی، محمدحسین شریعت، محمدابراهیم بحرالعالم، "لایه نشانی آلیاژ Ni-Zn-P و نانوکامپوزیت Ni-Zn-P/nano SiC از یک حمام جدید به روش آبکاری الکتریکی و بررسی ویژگی های خوردگی آن"، *مجله مواد نوین*، سال دوم، شماره ۲.
- 12- C. F. Malfatti, H. M. Veit, C. B. Santos, M. Metzner, H. Hololeczek, and J.P. Bonino, "heat treated NiP-SiC composite coatings: elaboration and tribocorrosion behaviour in NaCl solution", *Tribol Lett*, 36, pp. 165-173, 2009.