

بررسی میکروسختی و مقاومت سایشی پوشش‌های کامپوزیتی طلا- کبالت- نانوالماس تولید

شده به روش رسوب گذاری الکتریکی همزمان

پیمان ژگان^{(۱)*}

سید محمد مهدی هادوی^(۲)

(۱) کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

(۲) دانشیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته فلزی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ ثبت اولیه: ۸۶/۱۰/۲۴، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۸۷/۲/۴، تاریخ پذیرش: ۸۷/۷/۲۴

چکیده پوشش‌های طلا به خاطر کاربرد حساس و همچنین ملاحظات اقتصادی، بایستی از سختی و مقاومت سایشی بالایی برخوردار باشند. در این پژوهش با به کارگیری حمام اسیدی طلا، ذرات الماس ۵ نانومتری به همراه کبالت و طلا روی زیر لایه مس رسوب همزمان کرده و یک پوشش کامپوزیتی با مقاومت سایشی و سختی بالا ایجاد شده است که می‌تواند در پوشش دهی تجهیزات مورد استفاده در صنایع الکترونیک و مصارف تزئینی به کار آید. نتایج آزمون میکروسختی و آزمون سایش روی نمونه‌های تولیدی نشان می‌دهند که با افزایش میزان نانو ذرات الماس در حمام، میکروسختی و مقاومت سایشی این پوشش‌ها نسبت به پوشش آلیاژی طلا- کبالت به طور محسوسی افزایش یافته است؛ به طوری که حضور ۱۲ گرم بر لیتر نانو الماس در حمام موجب افزایش ۲۵ درصدی میکروسختی نسبت به پوشش آلیاژی طلا- کبالت شده است. افزون بر این، مقاومت سایشی پوشش به دست آمده ۴ برابر پوشش آلیاژی طلا- کبالت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی آبکاری الکتریکی، پوشش آلیاژی طلا کبالت، مقاومت سایشی، میکروسختی، نانو ذرات الماس.

*عهده دار مکاتبات

نشانی: تهران، میدان ونک، خیابان ملاصدرا، خیابان شیراز جنوبی، کوچه اتحاد پلاک ۱۰ طبقه دوم، کد پستی: ۱۴۳۵۸۴۶۴۴۴

تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۶۳۲۲۲ پست الکترونیکی: Peyman_230@yahoo.com

۱- مقدمه

با پیشرفت صنایع الکترونیک و ارتباطات در دهه‌های اخیر استفاده از پوشش طلا برای پوشش دادن قطعات الکترونیکی توسعه یافته است. در سیستم‌های ارتباطی و کامپیوترهای مدرن، سیستم‌های حاوی کانکتورهای بسیار حساس، کنداکتورها، ترمینال‌ها، بردهای مدار چاپ که بهترین قابلیت تماس بین اجزا بایستی برقرار باشد و در کاربردهای فضایی که قطعه تحت خلأ و شرایط آب و هوایی مختلف با فشارهای بالا قرار می‌گیرد، این پوشش خواص چشمگیری از خود نشان می‌دهد.

کبالت از لحاظ خواص مغناطیسی بعد از آهن قرار دارد و این خواص تا دمای ۱۱۱۵ درجه سانتیگراد پایدار است. از کبالت برای ساختن آلیاژهای سخت گرمایشی الکتریکی استفاده می‌شود. در دهه‌های اخیر با استفاده از ذرات کبالت برای تهیه آلیاژهای طلا-کبالت، خواص سختی و مقاومت سایشی پوشش طلا بهبود یافته است [۱].

از طرف دیگر با توجه به سختی بالای الماس و نیز با پیشرفت تولید نانو مواد، دانشمندان بر آن شدند تا با استفاده از روش‌های انفجاری نانوذرات الماس تولید نمایند و پس از انجام پالایش شیمیایی، این ماده سخت با خواص شگفت‌انگیز را در مصارف صنعتی به‌کار گیرند.

فرایند پالایش نانوذرات الماس از اهمیت خاصی برخوردار است؛ چرا که مقادیر کم گرافیت یا کربن آمورف ناخالصی ایجاد می‌کنند. وجود سایر ساختارهای کربنی در الماس باعث تغییر در خواص ویژه آن می‌شود. پالایش نانوذرات الماس در یک سیستم برگشت پذیر انجام می‌شود که در آن ۲ گرم نانو ذرات الماس به مدت ۴۲ ساعت در دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد در اسید نیتریک ۴ مولار جوشانیده می‌شود. سپس نمونه‌ها فیلتر شده و با آب خالص و در نهایت با الکل متیلیک شستشو می‌شوند [۲ و ۳].

برای بهبود سختی و مقاومت سایشی پوشش‌های فلزی می‌توان از نانوذرات الماس در فرایندهای پوشش دادن

الکتریکی و الکترولس (Electroless) استفاده نمود. با حضور نانوذرات الماس در فرایند رسوب‌گذاری، این ذرات به همراه فلز پایه روی زیرلایه رسوب کرده و به این ترتیب پوشش کامپوزیتی حاصل می‌گردد [۴ و ۵].

تحقیقات بسیار اندکی در زمینه پوشش‌های کامپوزیتی طلا انجام شده است. محققان ایتالیایی در سال ۲۰۰۵ میلادی توانستند پوشش‌های کامپوزیتی طلا-نانوالماس را با به کارگیری حمام سولفیتی ایجاد کنند و پوشش‌های حاصله را برای مصارف تزئینی به کار برند [۶]. در این پژوهش با به کارگیری حمام اسیدی و استفاده از کبالت در حمام، پوشش‌های کامپوزیتی طلا-کبالت- نانو الماس برای مصارف صنعتی و تزئینی تولید شده است.

۲- روش انجام آزمایش

فرایند رسوب‌گذاری در یک حمام اسیدی طلا، با افزودن ذرات کبالت و نانوذرات الماس ۵ نانومتری و ایجاد فرصت ۱۰ دقیقه‌ای برای نشست ذرات انجام شده است. ترکیبات حمام آبکاری و شرایط انجام رسوب‌گذاری در جدول (۱) آورده شده است.

نانو ذرات الماس به کار رفته در فرایند رسوب‌گذاری، با تکنیک‌های انفجاری تهیه شده‌اند که با انجام فرایند پالایش شیمیایی ناخالصی‌های آنها زدوده شده است.

نانو ذرات الماس وقتی در محلول قرار می‌گیرند به دلیل اندازه بسیار ریزشان به شدت تمایل دارند به یکدیگر چسبیده و به صورت آگلومره در آیند. با به کارگیری دستگاه تولیدکننده امواج ماورای صوت و قرار دادن الکترولیت در معرض این امواج با فرکانس ۲۰ KHz به مدت ۲۰ دقیقه قبل از انجام رسوب‌گذاری، میزان آگلومره شدن ذرات به حداقل رسیده است. بدین ترتیب توزیع مناسبی از ذرات تقویت‌کننده در فاز زمینه حاصل گردیده است. در زمان انجام فرایند رسوب‌گذاری یک هم زن با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه الکترولیت را هم می‌زند تا از ته نشین شدن ذرات

جلوگیری شود.

جدول ۱ ترکیبات حمام آبکاری و شرایط انجام رسوب گذاری

اسیدی (pH بین ۴ تا ۵)	نوع حمام
1 A/dm^2	دانسیته جریان
2 ± 37 درجه سانتیگراد	دما
۱۰ دقیقه	زمان رسوب گذاری
۲۰ دقیقه	آوادهی الکترولیت
۲۰ کیلو هرتر	فرکانس آوادهی
۱۰۰ دور در دقیقه	سرعت هم زن
۱ لیتر	حجم سل آبکاری
۵۰ گرم بر لیتر	تری پتاسیم سیترات
۶ گرم بر لیتر	محلول طلا
۱ گرم بر لیتر	کبالت
برای تنظیم pH بین ۴-۵	اسید سیتریک
۵ و ۱۲ گرم بر لیتر	نانو الماس

جدول ۲ شرایط انجام آزمون میکروسختی

هرمی شکل، از جنس الماس	نوع فرو رونده
۱۰ گرم	بار اعمالی
۱۵ ثانیه	زمان اعمال نیرو
پولیش یک میکرون	آماده سازی سطح نمونه
پودر آلومینا	ماده پولیش
۵ مرتبه برای گزارش هر داده	تعداد انجام آزمون

جدول ۳ شرایط انجام آزمون سایش

۵×۵×۵ میلیمتر	ابعاد نمونه
آلومینا (سختی ۱۲۰۰ ویکرز)	گلوله
۲۵۰ گرم	بار اعمالی
۰/۰۵ متر بر ثانیه	سرعت دیسک
$21 \pm 0/5$ درجه سانتیگراد	دمای محیط
1 ± 25 %	رطوبت محیط
۱۲۰۰ ثانیه	زمان

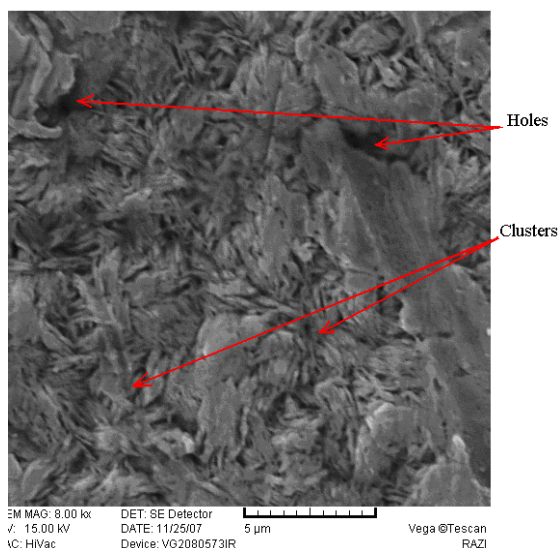
پس از تهیه پوشش ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از پوشش ها در بزرگنمایی های مختلف تصویربرداری شده است. سپس با انجام آنالیز EDS عناصر موجود در پوشش ها شناسایی شده اند و اطمینان حاصل شده است که پوشش ها یکنواخت بوده و فرایند رسوب گذاری با موفقیت انجام شده است.

با گرفتن تصویر SEM از مقطع عرضی نمونه ها توسط الکترون های برگشتی (Back scatter) ضخامت پوشش ها نیز تعیین شده است. ضخامت پوشش ها به طور میانگین در حدود ۱۰ میکرون اندازه گیری شده است. در ادامه با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscopy) از پوشش ها تصویر برداری شده و نانو ذرات الماس موجود در آنها شناسایی شده اند. سپس آزمون میکروسختی ویکرز روی پوشش ها انجام شده که شرایط انجام آزمون در جدول (۲) آمده است.

برای سنجش میزان مقاومت سایشی پوشش ها از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک (Pin on disk) در شرایط مشخص استفاده شده است که شرایط انجام آن در جدول (۳) آورده شده است. در این آزمون یک گلوله از جنس آلومینا روی سطح نمونه با اعمال بار مشخصی قرار گرفته است. نمونه شروع به گردش می کند و فرایند سایش انجام می شود. وزن نمونه ها قبل و بعد از آزمون ۳ نوبت با ترازوی با دقت $0/0001$ گرم اندازه گیری شده و میزان کاهش وزن آنها به عنوان پارامتر مقاومت سایشی گزارش شده است. در هر مرحله قبل از اندازه گیری وزن، نمونه ها به مدت ۱۰ دقیقه در محلول استن C_3H_6O در دستگاه چربی گیر آلتراسونیک قرار می گیرند تا ضمن چربی زدایی شدن اثرات وزنی گرد و غبار نیز از بین روند. بعد از تا چربی زدایی نمونه ها با دقت خشک می شوند و اندازه گیری وزن آنها انجام می شود. در زمان سایش از روی نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش، میانگین ضریب اصطکاک برای هر نمونه اندازه گیری شده است.

۳- نتایج و بحث

با حضور نانو ذرات الماس خنثی در حمام آبکاری یون‌های کبالت و طلا روی سطح نانو ذرات جذب شده و به این ترتیب نانو ذرات الماس دارای بار مثبت می‌شوند. سپس نانو ذرات به سبب باردار شدن به سمت کاتد حرکت می‌کنند و روی زیر لایه رسوب‌گذاری می‌کنند. CO^{2+} به آسانی جذب نانو ذرات الماس می‌شود و از این رو نیروی جاذبه الکترواستاتیک بین ذرات الماس و کاتد را افزایش می‌دهد و در نتیجه میزان الماس بیشتری در زمینه رسوب‌گذاری می‌کند. همچنین حضور کبالت در محلول آبکاری میزان پیوستگی (incorporation) ذرات را افزایش داده و میزان آگلومره شدن نانو ذرات در رسوب را کاهش می‌دهد [۷و۶].

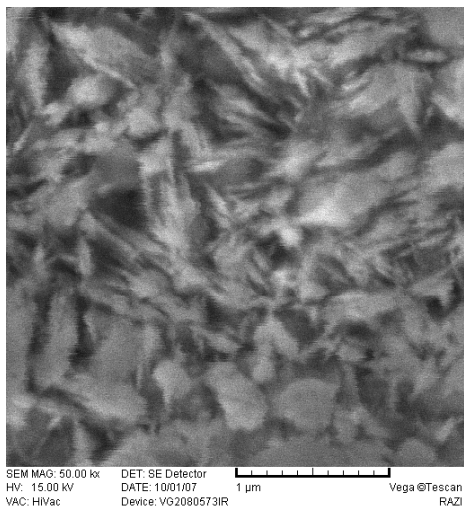


شکل ۱ تصویر SEM پوشش کامپوزیتی طلا کبالت نانو الماس (با ۵ گرم بر لیتر نانو الماس در حمام).

مورفولوژی سطح پوشش شدیداً به پیوستگی نانو ذرات الماس وابسته است و نشان می‌دهد که نحوه جاگیری ذرات در لایه در حال رشد ممکن است سبب ایجاد شکل‌های خوشه مانند شود. در سطح در حال رشد اثرات رفتار ماورای صوت و تغییر تدریجی مورفولوژی لایه‌های کامپوزیتی به زمان رسوب‌گذاری وابسته است. حضور نانو ذرات الماس در فلز زمینه سبب شکل‌گیری حفرات یا شرایط سطحی مشابه آن می‌شود و یک اثر حفاظتی اعمال می‌کند. اندازه و تعداد

۳-۱ ریز ساختار و آنالیز فازی. تصاویر SEM گرفته شده از نمونه‌ها در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهند که طلا و کبالت در هم حل شده‌اند و یک زمینه تک فاز یکنواخت حاصل شده است. آنالیز EDS پوشش نیز نشان می‌دهد که طلا و کبالت به طور موفقیت‌آمیزی روی زیر لایه رسوب‌گذاری کرده‌اند. شکل (۱) مورفولوژی سطح پوشش طلا کبالت نانو الماس را نشان می‌دهد. آنالیز این تصویر نشان می‌دهد که درصد وزنی طلا ۷۸٪، کبالت ۰/۷٪ و کربن ۲۱٪ می‌باشد.

پیوستگی نانو ذرات الماس در پوشش‌های کامپوزیتی تحت تاثیر فاکتورهای مختلفی قرار دارد که شامل میزان نانو ذرات در حمام، اعمال رفتار ماورای صوت (Ultrasonic treatment) قبل از انجام رسوب‌گذاری، pH و دانسیته جریان رسوب می‌باشد. میزان نانو ذرات در حمام مهمترین فاکتور تعیین کننده پیوستگی ذرات است و با افزایش میزان نانوذرات، پیوستگی افزایش می‌یابد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که میزان پیوستگی رسوب برای الکترولیتی که تحت رفتار ماورای صوت قرار نگرفته در مقایسه با الکترولیتی که تحت رفتار ماورای صوت قرار گرفته،



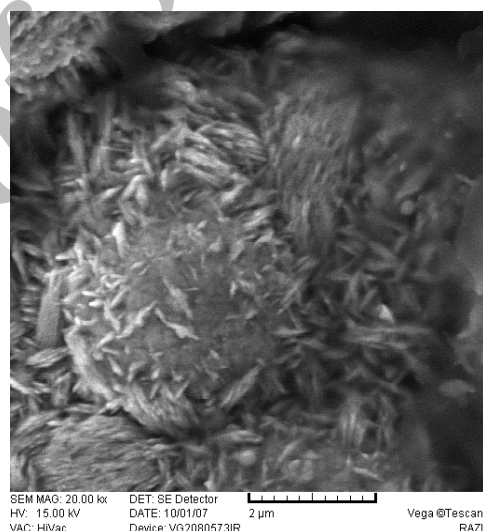
شکل ۴ تصویر SEM از یک نمونه پوشش کامپوزیتی طلا کبالت نانو الماس (با ۵ گرم بر لیتر نانو الماس در حمام).

۲-۳ تصویربرداری توسط میکروسکوپ نیروی اتمی. با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای مشاهده نانو ذرات الماس، از پوشش‌های کامپوزیتی تصویر برداری شده است. شکل (۵) تصاویر سطح پوشش‌ها که توسط این نوع میکروسکوپ گرفته شده است را در مقیاس‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به بهبود میکروسختی و مقاومت سایشی پوشش‌های کامپوزیتی طلا-کبالت-نانو الماس نسبت به پوشش‌های آلیاژی طلا-کبالت، انتظار می‌رود بهبود این خواص به سبب حضور نانو ذرات الماس باشد که در شکل (۴) به صورت نقاط سفید نمایان شده‌اند.

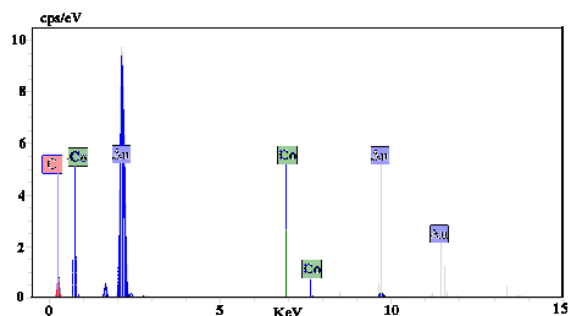
همانطور که مشاهده می‌شود نانو ذرات الماس در برخی از مناطق سطح به صورت خوشه‌ای رسوب گذاری کرده‌اند. این امر به دلیل تمایل شدید نانو ذرات به آگلومره شدن در محلول می‌باشد که البته با آوادهی الکترولیت به مدت ۲۰ دقیقه قبل از انجام رسوب گذاری میزان آگلومره شدن نانو ذرات به حداقل رسیده است. همانطور که مشاهده می‌شود در لبه‌ها رسوب گذاری بیشتری انجام شده و این امر به دلیل تمرکز جریان در لبه‌ها و نقاط تیز زیر لایه می‌باشد.

نشانه‌ها وابسته به دانسیته جریان رسوب گذاری و پیوستگی ذرات است. در شکل (۲) تصویر SEM از یک نمونه پوشش کامپوزیتی طلا کبالت نانو الماس مشاهده می‌شود. اسکن خطی گرفته از بخشی از این تصویر نشان می‌دهد که مناطق تیره مربوط به حفره می‌باشند. آنالیز EDS این تصویر نیز نشان می‌دهد درصد وزنی طلا ۰.۸۵٪، کبالت ۰.۰۴٪ و کربن ۰.۱۴٪ می‌باشد. شکل (۳) منحنی آنالیز EDS این تصویر را نشان می‌دهد.

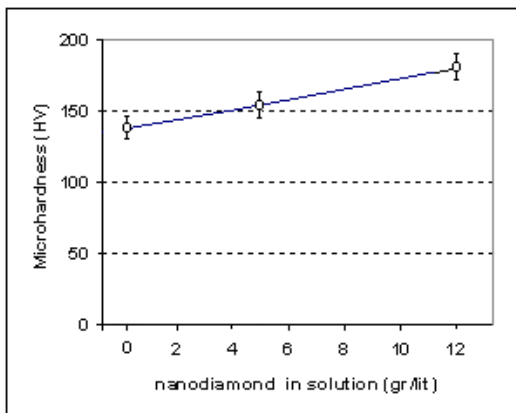
شکل (۴) مورفولوژی سطح یک نمونه پوشش کامپوزیتی طلا کبالت نانو الماس را در بزرگنمایی بالاتری نشان می‌دهد.



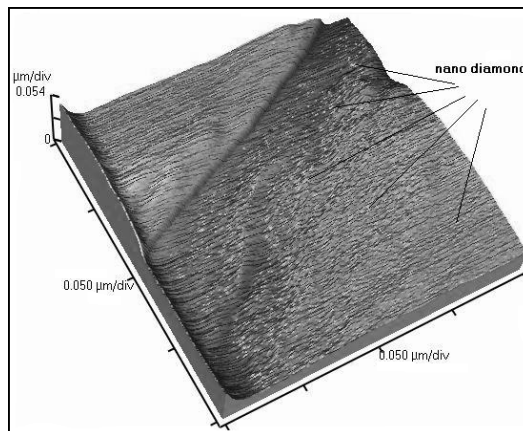
شکل ۲ تصویر SEM از یک نمونه پوشش کامپوزیتی (با ۵ گرم بر لیتر نانو الماس در حمام).



شکل ۳ منحنی آنالیز EDS (شکل ۲)



شکل ۶ ارتباط میکروسختی پوشش‌های کامپوزیتی طلا کبالت نانو الماس با میزان نانو ذرات الماس در محلول

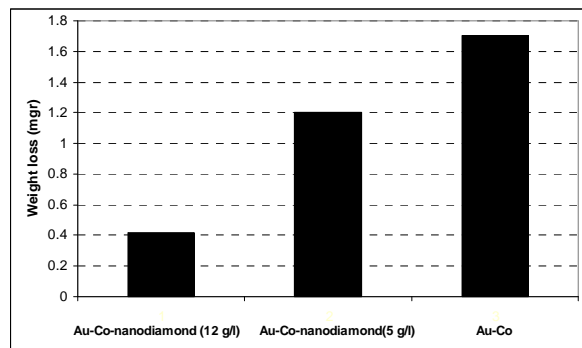


شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی پوشش کامپوزیتی طلا- کبالت- نانوالماس (با ۱۲ گرم بر لیتر نانوالماس).

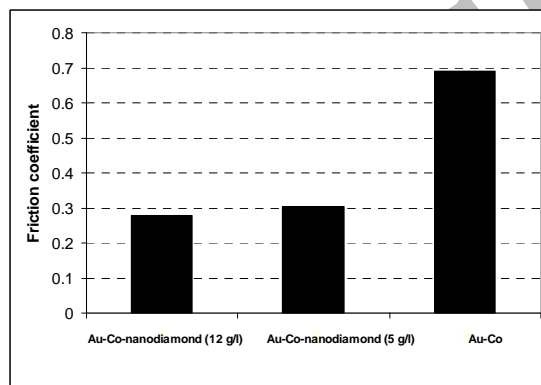
۳-۴ اندازه گیری میکروسختی. شکل (۶) ارتباط میکروسختی پوشش‌های کامپوزیتی طلا کبالت نانوالماس با میزان نانوالماس در محلول آبکاری را نشان می‌دهد. میکروسختی پوشش‌های حاصل از حمام محتوی ۵ گرم بر لیتر نانو الماس در حدود ۱۵۲ ویکرز و میکروسختی پوشش‌های حاصل از حمام محتوی ۱۲ گرم بر لیتر نانو الماس در حدود ۱۷۸ ویکرز به دست آمده که در مقایسه با میکروسختی پوشش آلیاژی طلا کبالت (۱۳۵ ویکرز) افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد.

میزان کاهش وزن نمونه‌ها بعد از انجام آزمون به عنوان پارامتر مقاومت سایشی گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزودن ۵ گرم بر لیتر نانو الماس به حمام آبکاری طلا کبالت مقاومت سایشی پوشش کامپوزیتی حاصله با ضریب ۱/۵ نسبت به پوشش طلا کبالت افزایش یافته است. همچنین افزودن ۱۲ گرم بر لیتر نانو الماس به حمام مقاومت سایشی پوشش حاصله را با ضریب ۴ نسبت به پوشش طلا کبالت افزایش داده است. شکل (۷) میزان کاهش وزن نمونه‌های مختلف بعد از انجام آزمون سایش را نشان می‌دهد. بهبود پارامتر مقاومت سایشی به خاطر اثر استحکام دهی زمینه ناشی از پراکندگی نانو ذرات الماس در آن و کاهش سطح تماس بین جفت سطوح فلزی توجیه می‌شود.

سختی و سایر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه فلزی به فاصله بین ذرات، ابعاد ذره فاز دوم، مقدار فاز دوم، شرایط کاری حمام و مشخصات زمینه بستگی دارند. آواهی الکترولیت قبل از رسوب‌گذاری نیز سبب افزایش میکروسختی پوشش حاصله می‌شود. در پوشش‌های کامپوزیتی حاصله افزایش در میکروسختی به دلیل سخت کاری حاصل از پراکندگی ذرات الماس در زمینه فلزی (مکانیزم سخت شدن فرآیندی) ایجاد شده است. مشابه چنین نتیجه‌ای را محققان دیگر نیز گزارش کرده‌اند [۶].



شکل ۷ میزان کاهش وزن نمونه‌ها (بر حسب میلی گرم) بعد از انجام آزمون سایش



شکل ۸ میانگین ضریب اصطکاک در آزمون سایش برای نمونه‌های مختلف

الماس (با ۵ گرم بر لیتر نانو الماس) $0/3$ و طلا کبالت نانو الماس (با ۱۲ گرم بر لیتر نانو الماس) $0/27$ اندازه گیری شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بیشترین ضریب اصطکاک مربوط به پوشش طلا کبالت می‌باشد و با افزودن نانو ذرات الماس به حمام آبکاری ضریب اصطکاک کاهش محسوسی داشته است. در فرایند سایش هر چه سطح نرمتر باشد ناهمواری‌های سطح بیشتر در هم فرو می‌روند و به این ترتیب، سطح تماس واقعی افزایش یافته و باعث افزایش نیروی اصطکاک و در نهایت افزایش ضریب اصطکاک می‌شود.

۴- نتیجه گیری

پوشش‌های کامپوزیتی طلا کبالت نانو الماس با هدف

دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک به کار رفته در این پژوهش مجهز به سیستم رایانه‌ای تعیین ضریب اصطکاک می‌باشد و رسم نمودار ضریب اصطکاک به وسیله یک سنسور انجام می‌شود و داده‌های دریافت شده از سنسور به صورت نمودار درج می‌گردد. از آنجا که تغییر ساختار پوشش سبب تغییر ضریب اصطکاک می‌شود، هنگام انجام آزمون سایش، نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش برای نمونه‌های مختلف رسم و به این ترتیب میانگین ضریب اصطکاک در سایش هر نمونه اندازه گیری شده است. شکل (۸) میانگین ضریب اصطکاک در آزمون سایش برای نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. میانگین ضریب اصطکاک برای پوشش طلا کبالت $0/69$ ، طلا کبالت نانو

است. پوشش‌های به دست آمده در پوشش دهی قطعات الکترونیکی، صنایع هوا - فضا و تزئینات با کاربری مقاومت به سایش، قابلیت کاربرد مناسبی را از خود نشان خواهند داد.

سپاسگزاری

این پژوهش در مرکز تحقیقات و فناوری مواد پیشرفته فلزی صورت گرفته است. نویسندگان به این وسیله از مسئولان و کارشناسان مرکز یاد شده تشکر و قدردانی می نمایند.

بهبود میکروسختی و مقاومت سایشی پوشش‌های طلا کبالت با استفاده از روش آبکاری الکتریکی همزمان به طور موفقیت‌آمیز تولید شده‌اند. حداکثر میزان نانو ذرات الماس در حمام آبکاری برای تولید این پوشش‌ها ۱۲ گرم بر لیتر بوده است. با تولید این پوشش‌ها ۲۵ درصد افزایش در میکروسختی حاصل شده است ضمن اینکه مقاومت سایشی این پوشش‌ها ۴ برابر مقاومت سایشی پوشش طلا کبالت می‌باشد. برای کاهش تمایل به آگلومره شدن ذرات، الکترولیت قبل از انجام رسوب‌گذاری توسط امواج ماورای صوت آوادهی شده

مراجع

1. F. H. Reid, and W. Goldie, "Gold plating technology", pp.43-51, (1982).
2. L. Riveros, D. A. Tryk, C.R. Cabrera, "Chemical purification and characterization of diamond nanoparticle for electrophoretically coated electrodes", Department of chemistry and center of nanoscale material, university of Puerto Rico, Rio Piedras, vol.256-260, (2005).
3. R. Acosta, J. De Jesus, F. Piazza, G. Morell, E. R. Fachini, "Purification of nano-crystalline ultra-dispersed diamond to be employed as nanoprobe for cellular imaging", Department of chemistry and physics, university of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, (2000).
4. N. R. Greiner, D. S. Philips, F. Volk. Nature, "Nanodiamond in Dentonation Soot", pp.333-440, (1998).
5. V. Dolmatov, "Dentonation synthesis Ultradispersed Diamonds: Properties and Applications", Russian Chemical Review, Vol. 70, PP. 607-626, (2001).
6. A. Vincenzo, P. Cojocar, P. L. Cavallotti, "Electrodeposition of Au/nanosized diamond composite coatings", J solid state Electrochem., PP. 850-858, (2005).
7. M. Pushpavanam, H. Manikandam, K. Ramanathan, "Preparation and characterization of nickel - cobalt - diamond electro composites by sediment co-deposition", surface and coating technology, Vol. 210 PP. 6372-6379, (2007).