

ایجاد پوشش‌های مقاوم به سایش روی زیر لایه فولاد CK45 به روش الکترواسپارک

علیرضا گل‌عذار^{۱*} و ابوالفضل امیر کاوئی^۲

۱- مدرس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی

۲- مدرس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

*alireza.golozar@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۳/۳۱، تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۶/۱۰)

چکیده

در این تحقیق پوشش‌های مختلفی بر روی سطح فولاد CK45 به روش الکترواسپارک اعمال شد و میکروساختار و خواص تریبولوژی سطح مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از دو نوع الکتروود شامل الکتروود سخت کاری فولاد کروم‌دار و الکتروود کامپوزیتی TiC-Ni استفاده گردید. برای بررسی میکروساختار و تعیین ترکیب رسوب‌های تشکیل شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیز EDX استفاده گردید. خواص تریبولوژیکی پوشش‌ها نیز به کمک آزمون سایش مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویر SEM نشان داد که در مورد نمونه خام سطح سایش دارای ورقه‌های در حال جدا شدن است و مکانیزم سایش ورقه‌ای دارد. تصاویر مربوط به سطح سایش نمونه با پوشش کامپوزیتی خراش‌های کمتری نسبت به نمونه پوشش داده شده با الکتروود کروم‌دار نشان داد. ریزساختار پوشش کامپوزیتی ذرات ریز TiC در زمینه نیکلی با توزیع یکنواخت را نشان داد. بر اساس نتایج کاهش وزن، نمونه‌های پوشش‌دار سایش کمتر از نمونه بدون پوشش داشتند و نمونه پوشش داده شده با الکتروود کامپوزیتی دارای سایش کمتری نسبت به پوشش فولادی کروم‌دار بود. نتایج تغییرات اصطکاک بر حسب مسافت لغزشی نمونه بدون پوشش مقدار اصطکاک متوسط ۰/۳۱ را نشان داد در حالی که مقدار اصطکاک نمونه پوشش داده شده کامپوزیتی پس از طی حدود ۱۰۰ متر مسافت به مقدار متوسط کمتر از ۰/۱۶۵ می‌رسد. مقدار اصطکاک کمتر در نمونه پوشش داده شده کامپوزیتی به دلیل تغییر مکانیزم سایش از ورقه‌ای به خراشان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

الکترواسپارک، پوشش دهی، سایش، کاربید تیتانیوم، CK45.

۱- مقدمه

مهندسی سطح عملیات‌هایی روی سطح است که برای بهبود خصوصیات سطحی مواد و ایجاد پوشش‌های سخت انجام می‌گیرد [۱]. پوشش دهی بر روی زمینه‌های مختلف امروزه به

طور گسترده‌ای در صنایع اتومبیل‌سازی، پتروشیمی و هوافضا

کاربرد پیدا کرده است [۲].

روش‌هایی مانند لحیم کاری، کربوره کردن، نیترووره کردن، نیتروکربوره، نیترووره، رسوب فیزیکی بخار (PVD)، رسوب

تولیدی به روش ESD شامل مواد الکتروود و زیر لایه است. هنگام بهینه‌سازی فرآیند ESD بایستی سیستم الکتروود-زیر لایه مورد تحلیل قرار گیرد زیرا که ترکیب فازی و خواص پوشش رسوبی به نوع ماده زیر لایه بستگی دارد [۷، ۸ و ۹].

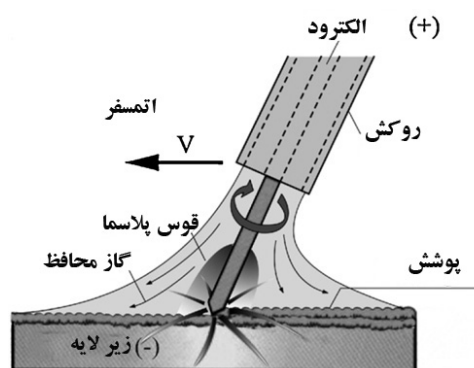
اعمال پوشش‌های سیستم Al-Ni [۸]، اصلاح و اعمال پوشش‌های کامپوزیتی TiC/Ni روی الکترودهای Cu-Cr-Zr [۹]، بررسی میکروساختار و خواص سایشی پوشش‌های سرمت بر پایه TiN روی فولاد زنگ‌نزن [۷] و اعمال پوشش‌های مختلف روی ابزارهای برش [۱۰]، از جمله تحقیقات اخیر در زمینه الکترواسپارک می‌باشد. اهمیت فرآیند الکترواسپارک در صنعت پوشش‌دهی در دهه گذشته به قدری قابل توجه بوده است که مقالات مختلفی در زمینه اصلاح پارامترهای فرآیند ارائه شده است [۱۱].

فلزات و آلیاژهای صنعتی مخصوص قالب‌های صنعتی به وسیله روش الکترواسپارک تعمیر یا پوشش داده می‌شوند تا خواص تریبولوژیکی آنها بهبود داده شود. فولاد CK45 نیز یکی از این آلیاژها است که با پوشش‌دهی می‌توان خواص سطحی آن را بهبود داد.

هدف از این تحقیق بررسی ریزساختار و خواص تریبولوژیکی پوشش‌های کامپوزیتی و فولادی کروم‌دار روی سطح فولاد CK45 است. در این راستا آزمون‌های سایش مختلفی انجام شد و به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مکانیزم‌های سایش بررسی شد.

۲- مواد و روش تحقیق

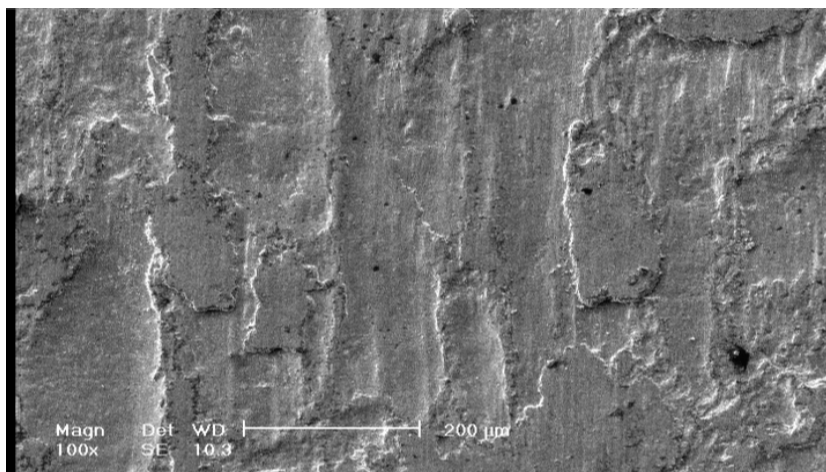
در این پژوهش از فولاد CK45 به عنوان فلز پایه و زیر لایه استفاده گردید (ترکیب C ۰/۴۱٪، Mn ۰/۷۶٪، Cr ۰/۰۹٪، Ni ۰/۰۸٪، Cu ۰/۱۹٪، Si ۰/۲۳٪، P ۰/۰۱٪). ابتدا نمونه‌هایی با ابعاد ۱۱×۲×۱ سانتی‌متر بریده شد و سپس سطح آن به طور مکانیکی و شیمیایی تمیز گردید. به منظور ایجاد پوشش الکترواسپارک از دو نوع الکتروود استفاده گردید. یکی از الکترودها مخصوص سخت‌کاری سطحی از جنس فولاد



شکل (۱): شماتیکی از روش پوشش‌دهی الکترواسپارک.

شیمیایی بخار (CVD) [۳ و ۴]، برای به دست آوردن یک سطح سخت و مقاوم به سایش به کار می‌روند. روش‌هایی مانند لیزر [۵]، پلاسما [۴]، اسپری پودر و روش جوشکاری تنگستن با گاز محافظ می‌توانند برای تشکیل لایه‌های پوششی به کار روند که در آن یک حالت شبه ذوب وجود دارد.

استفاده از روش‌هایی نظیر پاشش سوخت-اکسیژن با سرعت بالا (HVOF) [۳] و رسوب‌گذاری الکترواسپارک (ESD) [۴] از جمله پیشرفت‌هایی در زمینه بهبود خواص پوششی بر روی سطوح فلزات می‌باشند [۶]. بر خلاف روش HVOF، ترکیب پوشش ایجاد شده به روش ESD متفاوت از ترکیب الکتروود است. رسوب‌گذاری الکترواسپارک یک فرآیند میکروجوشکاری قوس-پالسی است که با استفاده از پالس‌های الکتریکی با جریان بالا و کوتاه‌مدت یک ماده الکتروود (آند) را روی یک زیر لایه (کاتد) اعمال می‌کند (شکل ۱). این روش یکی از محدود روش‌هایی است که یک پوشش ذوبی و پیوند داده به صورت متالورژیکی را با اعمال گرمای کم حاصل می‌کند و ماده زیر لایه نیز در دمای محیط یا نزدیک آن باقی می‌ماند. زمان کوتاه پالس الکتریکی باعث انجماد فوق سریع ماده رسوبی شده و پوشش با دانه‌بندی بسیار ریز و یکنواخت ایجاد می‌کند که در برخی موارد ساختار آمورف نیز به دست می‌آید. به موجب فرآوری فیزیکی و شیمیایی در فاصله الکتروود، ساختار اولیه ماده الکتروود تغییر کرده و یک لایه با ساختار اصلاح شده ظاهر می‌گردد که ساختار ثانویه نام دارد. به همین دلیل پوشش



شکل (۲): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه خام.

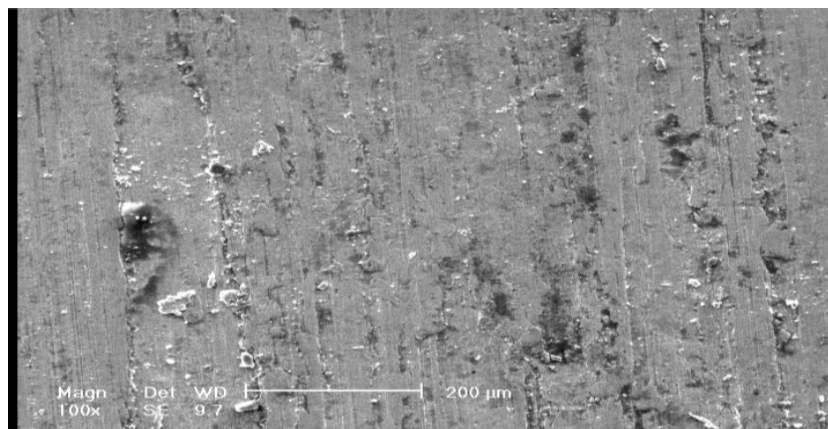
۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی خواص تریبولوژیکی و مکانیزم سایش، نمونه‌ها تحت آزمون سایش قرار گرفت و سطوح سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تحت بررسی قرار گرفتند. در شکل (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به سطح سایش نمونه خام آورده شده است. با توجه به شکل مسیر سایش دیده می‌شود که ذرات به صورت ورقه‌ای از سطح جدا شده‌اند و یک سری ذرات ورقه‌ای روی سطح وجود دارد که به علت توقف سایش هنوز از سطح جدا نشده‌اند. ذرات جدا شده به صورت ورقه‌ای بوده که تأییدکننده مکانیزم سایش ورقه‌ای برای این نمونه می‌باشد.

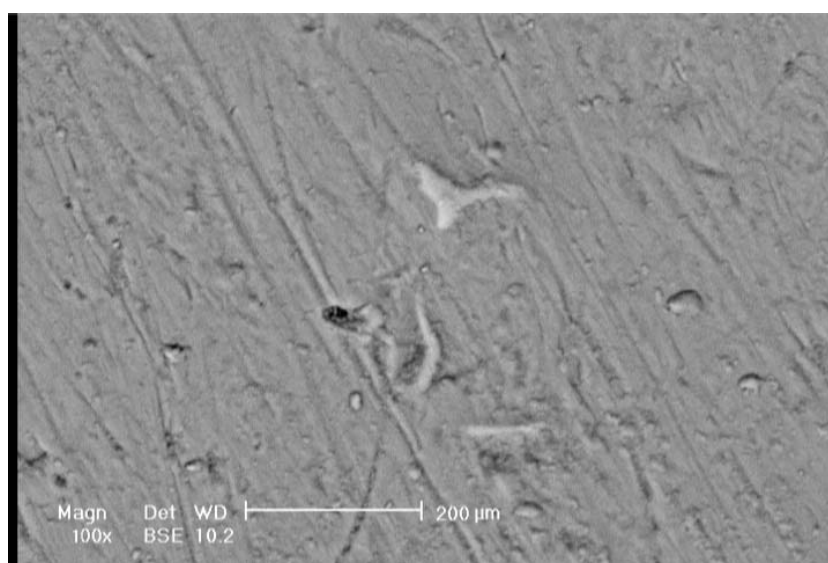
در توجیه این مکانیزم دو نظریه وجود دارد. اولین نظریه تئوری تجمع نابجایی‌ها در زیر سطح می‌باشد. با افزایش مسافت لغزش، نابجایی‌ها در فاصله کوتاهی از سطح تجمع می‌کنند. با افزایش دانسیته نابجایی‌ها، این نابجایی‌ها به هم پیوسته و یک سری حفرات تشکیل می‌شود. با گذشت زمان، حفره‌ها به هم می‌پیوندند و نهایتاً یک ترک به موازات سطح شکل می‌گیرد. وقتی طول ترک به حد بحرانی رسید، ماده بین ترک و سطح به صورت یک ذره ورقه‌ای شکل از سطح جدا می‌شود [۲].

کروم دار (۳/۵-۲/۵٪ کروم و ۰/۳-۰/۱۵٪ کربن) و دیگری الکتروکامپوزیتی با ترکیب TiC-Ni بود (ساخت روسیه). رسوب گذاری الکترواسپارک به کمک یک دستگاه مدل Alier-Metal 2000 انجام شد. شدت جریان دستگاه روی ۱۷۰ آمپر و فرکانس آن در ۵۰۰ هرتز تنظیم گردید. به منظور حفاظت بیشتر پوشش و کنترل اتمسفر نیز از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ استفاده گردید. ضخامت پوشش اعمال شده تحت شرایط این تحقیق در حدود ۳۰۰ μm می‌باشد.

به منظور بررسی و آنالیز سطوح از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips Xl30 مجهز به EDS استفاده گردید. آزمایش سایش خشک به روش رفت و برگشتی، در دمای محیط، با پین از جنس فولاد بلبرینگ DIN ۵۲۱۰۰ با سختی حدود ۶۴ راکول سی، ارتفاع ۵۰ میلی‌متر و شعاع عرقچین ۵ میلی‌متر انجام گرفت. حرکت پین در یک مسیر رفت و برگشتی به طول ۱۱ سانتی‌متر و با سرعتی معادل ۰/۱۶ متر بر ثانیه بر روی نمونه سایش انتخاب شد. آزمایش‌های سایش تحت نیروی ثابت ۱۸ کیلوگرم انجام گردید و کاهش وزن نمونه‌ها پس از طی مسافت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر ثبت شد.



شکل (۳): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه با پوشش فولاد کروم‌دار.

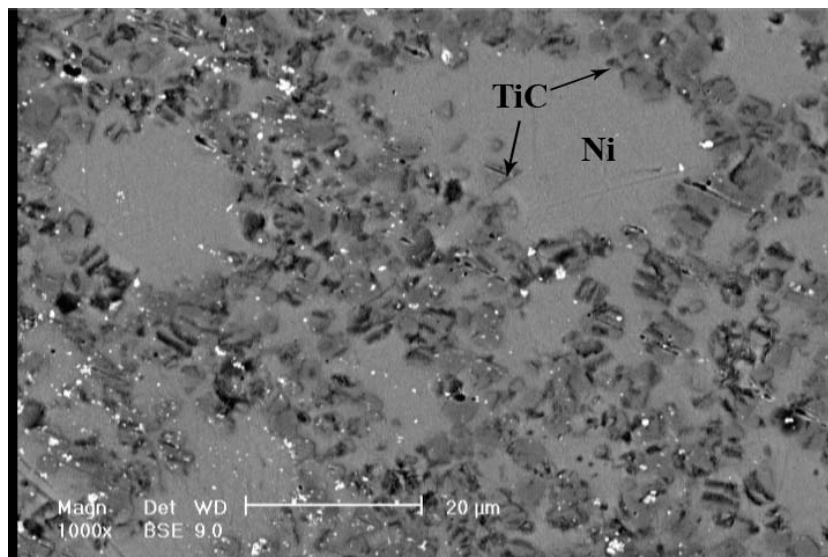


شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه با پوشش کامپوزیتی.

ماده و ضریب اصطکاک دارد، اشاعه یابند. در مکان‌های ضعیف و معینی این ترک‌ها سطح را از عمق برش داده و ذرات سایش به صورت ورقه‌های نازک و طولیل پدید می‌آید. ضخامت ذره سایش ورقه‌ای بسته به موقعیت رشد ترک در زیر سطح دارد و توسط نیروهای عمودی و مماسی کنترل می‌گردد [۲].

در شکل‌های (۳) و (۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌های پوشش داده شده با الکتروود فولاد کروم‌دار مخصوص سخت کاری سطحی و الکتروود کامپوزیتی نشان داده شده است. با توجه به تصویر مسیر سایش مشاهده

در تئوری بعدی که تئوری تنش‌های فشاری در سطح نام دارد گفته می‌شود هنگامی که دو سطح لغزش در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، به واسطه بارگذاری مکرر، ناهمگونی‌های سطح نرم‌تر به راحتی تغییر شکل یافته و برخی از آنها شکسته می‌شوند. ناهمگونی‌های سطح سخت‌تر روی سطح نرم‌تر، تغییر شکل برشی پلاستیک ایجاد کرده و یک حالت کشیدگی در زیر سطح ایجاد می‌شود. با زیاد شدن این تغییر شکل‌ها ترک‌هایی در زیر سطح جوانه می‌زنند. با وجود تنش فشاری بالا ترک‌ها تمایل دارند به موازات سطح و در یک عمقی که بستگی به خواص



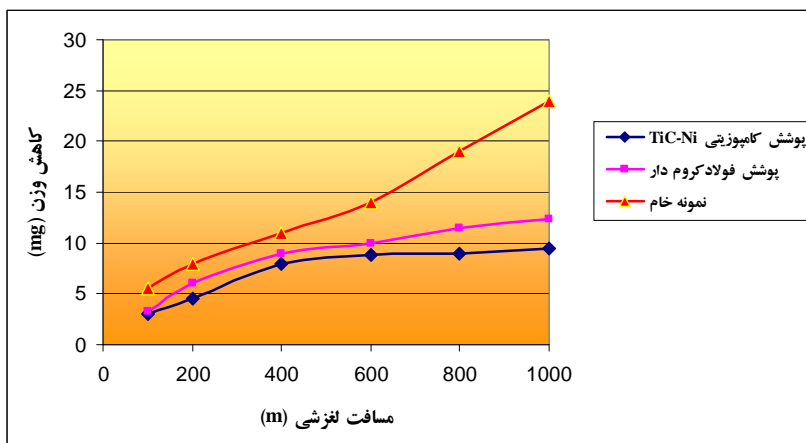
شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار پوشش کامپوزیتی.

در این تحقیق خواص تریبولوژیکی نمونه‌های خام و پوشش‌دار نیز بررسی شد. نمودار کاهش وزن بر حسب فاصله لغزشی در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطوری که از شکل مشخص است مقدار کاهش وزن در نمونه فولادی خام افزایش می‌یابد. در حالی که منحنی کاهش وزن مربوط به نمونه‌های پوشش‌دار کمتر از حالت خام است و پس از طی مسافت حدود ۶۰۰ متر ثابت می‌گردد. نمونه پوشش‌دار شده با الکتروود کامپوزیتی دارای سایش کمتری نسبت به پوشش فولادی کروم‌دار است. سایش کمتر نمونه‌های پوشش‌دار در توافق با تصاویر SEM سطوح پوشش است که مکانیزم سایش خراشان داشتند.

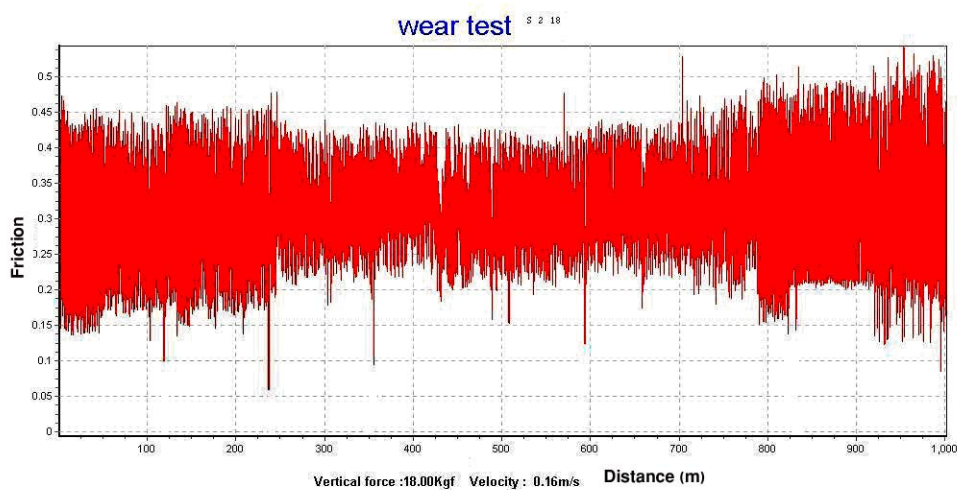
نمودار تغییرات اصطکاک بر حسب مسافت لغزشی نمونه خام بدون پوشش (شکل ۷)، مقدار اصطکاک متوسط ۰/۳۱ را نشان داد. میزان اصطکاک با طی مسافت تغییر چندانی نمی‌کند و به دلیل مکانیزم سایش ورقه‌ای در مسافت‌های بالا اصطکاک کمی افزایش و دامنه تغییرات بیشتر می‌گردد. نمودارهای مربوط به تغییرات اصطکاک نمونه‌های پوشش‌دار شده در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده است. نمونه پوشش‌دار شده با الکتروود فولاد کروم‌دار (شکل ۸)، مقدار اصطکاک متوسط ۰/۲۲ را نشان داد،

می‌شود که سطح دارای خراش‌های موازی در جهت مسیر سایش می‌باشد. شکل مسیر سایش و ذرات حاصل از سایش بیانگر سایش از نوع خراشان در نمونه‌های پوشش‌دار می‌باشد. شکل (۴) مربوط به سایش پوشش کامپوزیتی با وجود بزرگنمایی بالاتر دارای خراش خیلی کمتر است.

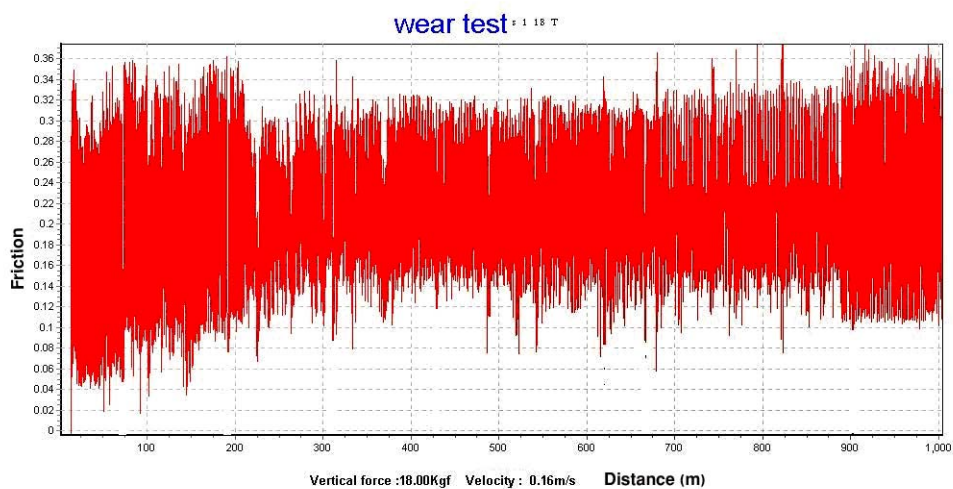
ریزساختار مربوط به پوشش کامپوزیتی در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود ذرات کاربیدی اندازه کوچکتر از ۵ μm دارند و به طور یکنواخت در زمینه فلزی توزیع شده‌اند. آنالیز EDX همراه با مشاهدات شکل ظاهری رسوبات تأیید کرد که ترکیب آنها کاربید تیتانیوم (TiC) است. وجود ذرات سرامیکی TiC توزیع شده در زمینه فلزی نیکلی باعث کاهش نرخ سایش می‌شود. اندازه کوچک ذرات کاربید تیتانیوم می‌تواند مربوط به انجماد سریع روش الکترواسپارک و جلوگیری از رشد دانه باشد. استفاده از کاربیدهای فلزی جهت پوشش‌دهی فولادهای مختلف در مراجع گزارش شده است [۲ و ۶]. با وجود ذرات سرامیکی در زمینه فلزی، خراش سطح موجب کنده شدن ماده نمی‌گردد و تنها ماده در سطح جابجا شده و به طور مرتب به صورت برآمدگی‌هایی در دو طرف شیار ایجاد شده انباشته می‌گردد [۱۲].



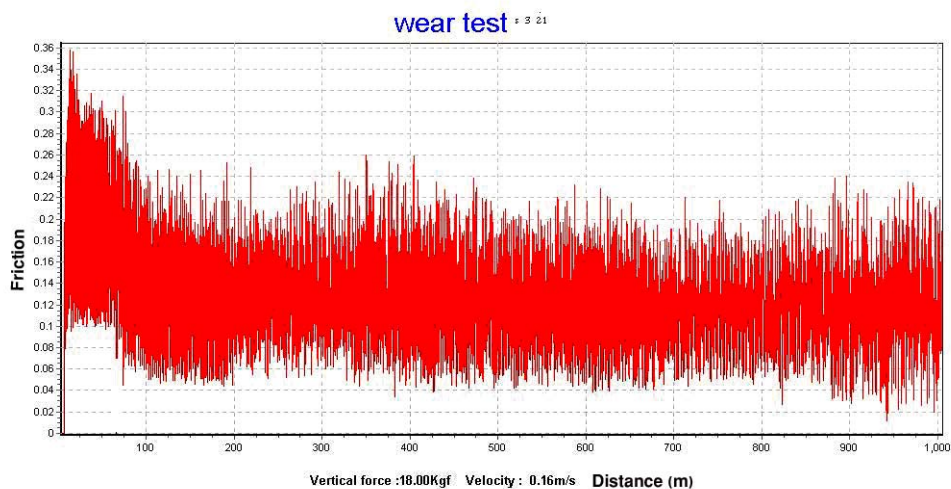
شکل (۶): نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت لغزشی.



شکل (۷): منحنی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزشی برای نمونه خام بدون پوشش.



شکل (۸): منحنی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزشی برای نمونه پوشش داده شده با الکتروکروم فولادی کروم دار.



شکل (۹): منحنی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزشی برای نمونه پوشش داده شده با الکترواد کامپوزیتی Ni-Ti-C.

۴- نتیجه گیری

ایجاد پوشش کامپوزیتی TiC-Ni و پوشش فولاد کروم دار بر روی زیر لایه فولادی به روش الکترواسپارک امکان پذیر است. تصاویر SEM نشان داد که در سطح نمونه بدون پوشش یک سری ریز ترک‌هایی ایجاد می‌شود که با ادامه سایش موجب جدا شدن لایه‌های سطحی می‌گردد. همچنین مکانیزم سایش در نمونه‌های خام از نوع ورقه‌ای و در نمونه‌های پوشش دار از نوع خراشان می‌باشد. ریزساختار مربوط به پوشش کامپوزیتی ذرات کاربیدی ریز با توزیع یکنواخت در زمینه فلزی را نشان داد. وجود ذرات سرامیکی TiC توزیع شده در زمینه فلزی نیکلی باعث کاهش نرخ سایش می‌شود. منحنی کاهش وزن مربوط به نمونه‌های پوشش دار سایش کمتر از حالت خام را نشان داد و نمونه پوشش داده شده با الکترواد کامپوزیتی دارای سایش کمتری نسبت به پوشش فولادی کروم دار است. نمودار تغییرات اصطکاک بر حسب مسافت لغزشی نمونه بدون پوشش مقدار اصطکاک متوسط ۰/۳۱ را نشان داد در حالی که مقدار اصطکاک نمونه پوشش داده شده کامپوزیتی پس از طی حدود ۱۰۰ متر مسافت به مقدار متوسط ۰/۱۶۵ می‌رسد. مقدار اصطکاک کمتر در نمونه پوشش داده شده کامپوزیتی به دلیل تغییر مکانیزم سایش از ورقه‌ای به خراشان می‌باشد.

در حالی که نمونه پوشش داده شده کامپوزیتی (شکل ۹)، در ابتدا مقدار اصطکاک متوسط ۰/۲۲ داشت که پس از طی حدود ۱۰۰ متر مسافت به مقدار متوسط ۰/۱۶۵ می‌رسد. مقدار اصطکاک کمتر در نمونه پوشش داده شده کامپوزیتی به دلیل تغییر مکانیزم سایش از ورقه‌ای به خراشان می‌باشد. وجود ذرات ریز سرامیکی TiC در زمینه نیکلی موجب خراش کمتر و سایش کم نسبت به نمونه خام و پوشش داده شده با فولاد کروم دار می‌گردد. خواص تریبولوژیکی پوشش‌های TiC روی زیر لایه‌های فولاد زنگ‌نزن C 440 نیز توسط روش پاشش مگنترون^۵ مورد مطالعه قرار گرفته است. طبق نتایج به دست آمده پوشش TiC با ضخامت $2\mu\text{m}$ باعث ضریب اصطکاک در محدوده ۰/۲۲-۰/۱۹ می‌گردد [۱۳]. در مقاله دیگری خواص سایشی پوشش‌های کاربیدی و نیتربیدی روی فولادهای AISI1020 و AISI52100 مورد بررسی قرار گرفت [۱۴]. نتایج این تحقیق نشان داد که پوشش‌های کاربیدی کروم و نیتربیدی تیتانیوم می‌توانند به ترتیب باعث کاهش ضریب اصطکاک به میزان ۲۰٪ و ۱۹٪ شوند [۱۴].

- [10] S. Ghabrial and S. J. Ebeid, "The Effect of Electrospark Hardening on the Wear Resistance of High Speed Steel", *Wear*, Vol. 71, pp. 347-354, 1981.
- [11] V. Alexander, O. Sahin and K. Korkmaz, "A Modified Electrospark Alloying Method for Low Surface Roughness", *Surface & Coatings Technology* 203, pp. 3509-3515, 2009.
- [12] T. S. Eyer, "Wear Characteristics of Metals", *Tribology International*, Vol. 9, No. 10, pp. 1-10, 1979.
- [13] J. Tang, L. Feng and J. S. Zabinski, "The Effects of Metal Interlayer Insertion on the Friction, Wear and Adhesion of TiC Coatings", *Surface and Coatings Technology* 99, pp. 242-247, 1998.
- [14] U. Sen, "Friction and Wear Properties of Thermo-Reactive Diffusion Coatings against Titanium Nitride Coated Steels", *Materials and Design* 26, pp. 167-174, 2005.

۶- پی نوشت

- 1- Physical Vapor Deposition
- 2- Chemical Vapor Deposition
- 3- High Velocity Oxygen Fuel
- 4- Electro Spark Deposition
- 5- Magnetron Sputtering

۵- مراجع

- [1] N. Abe, et. al, "Formation of WC-Co Layer by an Electron Beam Cladding Method and Evolution of the Layer Properties", *Vacuum* 59, pp. 373-400, 2000.
- [2] Z. Lio, et. al6, "Preparation of WC-Co Composite Powder by Electroless Plating and Application in Laser Cladding", *Materials letters*, Vol. 60, pp. 1956-1959, 2006.
- [3] J. R. Dvis, & Associates, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", *ASM Handbook*, Vol. 2, pp. 950-1008, 1997.
- [4] J. R. Dvis, & Associates, *Hard Facing, Weld Cladding, and Dissimilar Metal Joining*", *ASM Handbook*, Vol. 6, pp. 789-829, 1992.
- [5] H. Udin, E. R. Funk, Wulf., "Welding for Engineers", New York, John Wiley and Sons Publications, 1954.
- [6] E. I. Zamulaeva, E. A. Levashov and A. E. Kudryashov, "Electrospark Coatings Deposited onto an Armco Iron Substrate with Nano and Microstructured WC-Co Electrodes", *Surface & Coatings Technology* 202, pp. 3715-3722, 2008.
- [7] X. Li, D. Q. Suna and X. Y. Zheng, "Microstructures and Wear Properties of TiN-Based Cermet Coating Deposited on 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel by Electrospark Process", *Materials Science and Engineering A* 490, pp. 126-130, 2008.
- [8] D. W. Heard and M. Brochu, "Development of a Nanostructure Microstructure in the Al-Ni System Using the Electrospark Deposition Process", *Journal of Materials Processing Technology* 210, pp. 892-898, 2010.
- [9] Z. Chen and Y. Zhou, "Surface Modification of Resistance Welding Electrode by Electro-Spark Deposited Composite Coatings: Part I. Coating Characterization", *Surface & Coatings Technology* 201, pp. 1503-1510, 2006.