

بررسی تأثیر زبری سطح زیرلایه بر رفتار تریبولوژیکی پوشش کروم سخت

علیرضا صالحی، علی زقر و تقی شهبابی فراهانی

چکیده: در این پژوهش تأثیر زبری سطح فلز زیرلایه بر رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های کروم سخت رسوب داده شده بر روی فولاد DIN ۱/۶۹۵۹ عملیات حرارتی شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. پوشش‌ها بر روی زیرلایه‌هایی با زبری‌ها متوسط ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۳ و ۲/۲ میکرون که به روش مکانیکی و همچنین ۰/۰۷ و ۰/۱۴ میکرون که به روش الکتروپولیش ایجاد شده‌اند، رسوب داده شدند. رفتار سایشی و اصطکاکی پوشش‌ها بوسیله دستگاه "گلوله روی دیسک" در شرایط لغزشی خشک با استفاده از گلوله ساینده آلومینا تحت نیروهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسیها نشان داد که زبری سطح و سختی پوششها متأثر از زبری سطح زیرلایه خود می‌باشند. بررسی میزان سایش نمونه‌ها تحت نیروی اعمالی ۲kgf نشان داد که پوشش با زبری متوسط زیرلایه ۰/۰۵ میکرون کمترین سختی و بیشترین میزان سایش را داشته و با کاهش زبری متوسط سطح و یا با افزایش آن از مقدار فوق، سختی و مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه با زبری متوسط سطح ۰/۰۷ میکرون که بوسیله فرآیند الکتروپولیش با جریان منقطع بدست آمد، بهترین مقاومت به سایش را نشان داد. در این حالت در مسافت لغزش کوتاه، مکانیزم سایش غالب از نوع خراشان و در مسافت لغزش طولانی، پوسته‌ای شدن یا به عبارتی مکانیزم غالب خستگی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: زبری سطح، تریبولوژی، سایش، اصطکاک، کروم سخت

۱. مقدمه

پوشش دادن یکی از روشهای تکمیل سطح مواد می‌باشد که به منظورهای مختلفی از جمله مسائل تزئینی، بهداشتی و مکانیکی اعمال شده و با استفاده از آن می‌توان خواص خوردگی، سایشی و اصطکاکی فلزات را بهبود بخشید و هزینه تولید را با توجه به عمر نهایی کاهش داد. پوششهای کروم ایجاد شده به روش الکتروپولیش بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [1] استفاده از این پوششها برای حفاظت از فلزات در صنعت به اثبات رسیده است [2]. یکی از عواملی که رفتار تریبولوژیکی پوششهای سخت را تحت تأثیر قرار می‌دهد زبری سطح پوشش می‌باشد [3].

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۴/۱ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۹/۲۹ به تصویب نهایی رسیده است.

علیرضا صالحی، دانشجوی دکترا بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
علی زقر، دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
دکتر تقی شهبابی فراهانی، دانشیار بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، tshahrabi34@modares.ac.ir

زبری سطح زیرلایه مکانیزم رشد پوشش را تحت تأثیر قرار داده و عیوبی را در جهت پرداخت سطح در روی پوشش بوجود می‌آورد. بنابراین در آبکاری الکتریکی کروم برآمدگیهای گنبدی شکلی^۲ در جهت سمباده‌زنی بر روی سطح پوشش تشکیل شده و منجر به تغییر رفتار سایشی و اصطکاکی می‌شوند [4-5]. با ایجاد زبری سطح مناسب فلز زیرلایه می‌توان از تشکیل این برآمدگیها جلوگیری کرد.

در بسیاری از پوششهای سخت، تغییر شکل پلاستیکی بسیار محدود گشته و ضریب اصطکاک با افزایش زبری سطح، افزایش می‌یابد. از طرف دیگر سایش مواد به شدت بوسیله تنشهای موجود در محل تماس و زیر آن تحت تأثیر قرار می‌گیرد. آنالیز انجام شده بر روی شکل تماس بین سطوح صاف و سطوح زبر نشان می‌دهد که حداکثر تنش تماسی بین سطوح زبر بسیار بزرگتر از حداکثر تنش تماسی بین سطوح صاف ایده‌آل است. این عمل بطور منظم شرایط تماس در محل تماس حقیقی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با توجه به این واقعیت که تولید ذرات سایشی بوسیله شرایط تنش تماسی تعیین می‌گردد، انتظار می‌رود که تحت شرایط

جدول ۲. شرایط الکتروپولیش با جریان منقطع

دانسیتة جریان آندی	۲۵ A/dm ²
دانسیتة جریان کاتدی	۰ A/dm ²
دما	۵۰ °C
زمان آندی	۱۸۰ s
زمان کاتدی	۳۰ s
زمان کل الکتروپولیش	۶۰ min

۲-۲- فرآیند آبکاری

قبل از انجام عمل آبکاری ابتدا نمونه‌ها چربی‌گیری الکتریکی (به صورت آندی) و سپس اسید شویی شدند. آبکاری روی نمونه‌ها در محلول استاندارد با نسبت وزنی ۱۰۰:۱ اسید کرومیک به اسید سولفوریک (۲۵۰ g/l اسید کرومیک و ۲/۵ اسید سولفوریک) و با دانسیته جریان ۳۵ A/dm² به مدت ۴ ساعت انجام شد.

۲-۳- زبری، ضخامت و سختی سنجی

زبری سطح تمام نمونه‌ها قبل و بعد از آبکاری توسط پروفیلومتر سوزنی اندازه‌گیری شده است. هر عدد زبری گزارش شده حاصل میانگین ۹ مرتبه زبری سنجی در سه جهت مختلف بر روی سطح می‌باشد. در این پژوهش به منظور اندازه‌گیری زبری سطح از معیار زبری متوسط (R_a) استفاده شده است. ضخامت پوششهای ایجاد شده ۵۷ میکرون بود که میانگین ۲۰ مرتبه ضخامت سنجی در نقاط مختلف سطح پوشش توسط ضخامت سنج Monimeter مدل S2.310 می‌باشد. ریز سختی پوششها توسط میکروسختی سنج Micromet1 با فرورونده ویکرز با نیروی ۱۰۰ grf اندازه‌گیری شده است. میانگین ۸ مرتبه سختی سنجی بر روی هر نمونه به عنوان عدد سختی پوشش گزارش شده است.

۲-۴- آزمایش‌های سایش

آزمایشهای سایش لغزشی خشک بوسیله دستگاه گلوله روی دیسک (ساخت دانشگاه صنعتی اصفهان) و با استفاده از گلوله‌های آلومینا با قطر ۶/۶۳ mm انجام گرفت. سرعت خطی ۰/۱ m/s در نظر گرفته شد. دمای محیط ۲۱-۲۵ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۱۹-۲۴ درصد بود. ابتدا بر روی تمام نمونه‌ها آزمایشهای سایش تحت نیروی ثابت ۲kgf تا مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر انجام گرفت. سپس بر روی نمونه‌ای که کمترین میزان سایش را دارا بود، آزمایشها تحت نیروهای ۱، ۴ و ۵ kgf انجام گرفت.

با اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه‌ها پس از هر ۱۰۰ متر مسافت لغزش، نمودارهای کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش رسم

معین، سایش به شدت بوسیله پرداخت سطح تحت تأثیر قرار گیرد. بنابراین در پوششهای سخت نظیر کروم سخت که تغییر شکل پلاستیکی محدود می‌باشد بافت اولیه سطح اهمیت پیدا می‌کند [6]. زبری سطح و ضخامت پوشش تأثیر بسیاری بر اصطکاک دارد. عموماً با افزایش زبری سطح، اصطکاک نیز افزایش می‌یابد [7]. تأثیر ضخامت پوشش کروم سخت بر رفتار سایشی و همچنین دوام آن توسط برخی محققین بررسی شده است [8-9].

تحقیقات مشابهی بر روی تأثیر زبری سطح زیرلایه بر رفتار سایشی پوششهای DLC^۱ و همچنین تأثیر آن و ضخامت پوشش بر رفتار سایشی و اصطکاک پوشش MoS₂ - فلز انجام شده است [6-7].

لیکن مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون هیچگونه تحقیقی بر روی تأثیر زبری سطح فلز زیرلایه بر رفتار تریبولوژیکی پوششهای کروم سخت انجام نشده است؛ از اینرو در این پژوهش موضوع فوق بررسی شده و نتایج حاصل ارایه و بحث شده است.

۲. روش تحقیق

۲-۱- تهیه نمونه

فولاد مورد استفاده در این تحقیق از سری فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA) عملیات حرارتی شده با سختی ۴۱±۱ راکول سی می‌باشد. ابتدا نمونه‌های دیسکی شکل به قطر ۵۰ میلیمتر و ضخامت ۵ میلیمتر تهیه شد و سپس زبری‌های متوسط ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۳، ۰/۰۲ میکرون به روش مکانیکی توسط شماره‌های مختلف کاغذ سمباده و زبریهای متوسط ۰/۰۷ و ۰/۱۴ میکرون به ترتیب توسط فرآیند الکتروپولیش با جریان منقطع و جریان مستقیم حاصل گردید.

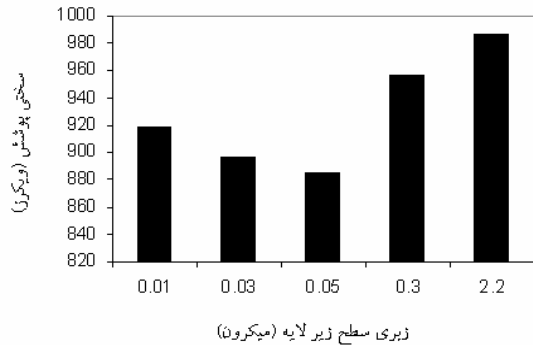
فرآیند الکتروپولیش در محلولی شامل ۱ لیتر اسید فسفریک، ۶۳ میلی لیتر اسید سولفوریک و ۱۷۳ گرم اسید کرومیک انجام شد که شرایط آن با جریان مستقیم و جریان منقطع به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارایه شده است.

عملیات تنش‌زدایی نمونه‌ها در دمای ۲۰۰ °C به مدت ۱ ساعت انجام گرفت.

جدول ۱. شرایط الکتروپولیش با جریان مستقیم

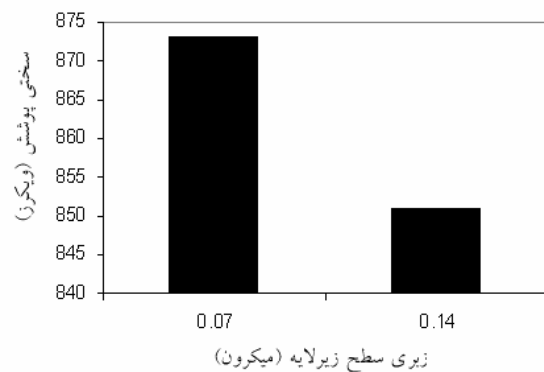
دانسیتة جریان	۲۵A/dm ²
دما	۵۰ °C
زمان	۵۰ min

سطوحی، نقاط نوک تیز و برآمده دانسیته جریان بالایی را تحمل کرده [11] و بدین ترتیب سختی پوشش ایجاد شده بر روی این نقاط بیشتر می‌شود. از آنجایی که صاف شدن سطح نمونه در حین پوشش‌دهی اتفاق نمی‌افتد [4] و با افزایش زمان پوشش‌دهی، زبری سطح نمونه نیز بیشتر می‌شود؛ لذا دانسیته جریان در نوک زبریها زیادتر شده و بدین ترتیب سختی سطح افزایش می‌یابد.



شکل ۲. ریزسختی سطح پوشش‌هایی که زبری زیر لایه آنها به روش مکانیکی بوجود آمده است

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش زبری زیر لایه از ۰/۰۷ به ۰/۱۴ میکرون سختی پوشش‌های ایجاد شده بر روی آنها کاهش می‌یابد. در این حالت نیز با افزایش زبری، سطح واقعی نمونه نیز افزایش یافته و با توجه به ثابت بودن جریان اعمالی جهت پوشش‌دهی، دانسیته جریان پوشش‌دهی کاهش می‌یابد. در نتیجه با کاهش دانسیته جریان، سختی پوشش حاصله نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۳. ریزسختی سطح پوشش‌هایی که زبری زیر لایه آنها به روش الکتروشیمیایی بوجود آمده است

۳-۳- رفتار سایشی پوشش‌ها

عملکرد سایش لغزشی خشک پوشش کروم سخت در برابر گلوله ساینده آلومینا مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴ منحنی مشخصه سایش برای پوشش‌هایی که زبری زیر لایه آنها به روش مکانیکی حاصل شده را تحت نیروی ۲kgf نشان

شد. از ترازویی با دقت یک ده هزارم گرم (مدل Sartorius) برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها استفاده گردید. به منظور تشخیص مکانیزم سایش غالب، اثر سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (نوع Philips مدل XL30) مورد ارزیابی قرار گرفت.

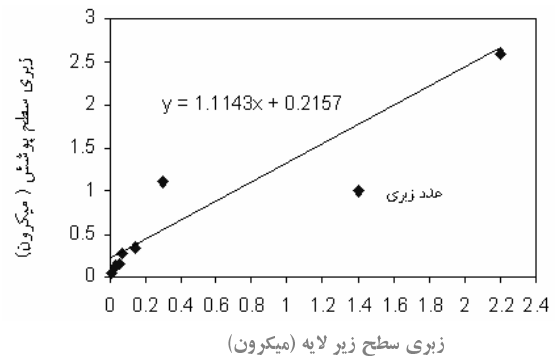
۳. نتایج و بحث

۳-۱- زبری سنجی

نتایج حاصل از زبری سنجی در سطح زیر لایه و پوشش نشان می‌دهد که زبری پوشش در مقایسه با زبری زیر لایه اولیه افزایش یافته است. در شکل ۱ زبری سطح پوشش‌ها بر حسب زبری زیر لایه آنها و همچنین رابطه تقریبی بین آنها نشان داده شده است. این نتایج با یافته‌های محققان دیگر نیز انطباق دارد [4-10].

۳-۲- ریزسختی سنجی پوشش‌ها

نتایج حاصل از ریزسختی سنجی در سطح پوشش‌های کروم ایجاد شده بر روی زیر لایه‌های با زبری متفاوت در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱. رابطه بین زبری سطح پوشش و زبری زیر لایه

در نمودار شکل ۲ با افزایش زبری زیر لایه از ۰/۰۱ به ۰/۰۵ میکرون، سختی پوشش کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه با کاهش دانسیته جریان پوشش‌دهی در آبکاری کروم، سختی پوشش نیز کاهش می‌یابد [11]؛ لذا به نظر می‌رسد عامل اصلی کاهش سختی، کاهش دانسیته جریان پوشش‌دهی در سطح آنها باشد. در ابتدا سطح کلیه نمونه‌ها یکسان بوده که با ایجاد زبریهای متفاوت در سطح آنها، سطح واقعی تغییر کرده است. در این حالت با افزایش زبری، سطح واقعی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد و از آنجایی که جریان اعمالی جهت پوشش‌دهی برای کلیه نمونه‌ها یکسان می‌باشد؛ لذا دانسیته جریان در سطح آنها کاهش می‌یابد. با افزایش زبری زیر لایه از ۰/۰۵ به ۲/۲ میکرون، ارتفاع برجستگیها به دلیل استفاده از سمباده‌های زبرتر، افزایش یافته و عمق فرورفتگی‌ها نیز بیشتر می‌گردد. در چنین

با توجه به اینکه عامل اصلی برای کاهش سایش خراشان افزایش سختی سطح است [3-12,15]؛ لذا میزان سایش پوشش‌ها با کاهش یا افزایش زبری زیرلایه از مقدار ۰/۰۵ میکرون (با افزایش سختی پوشش‌ها) کاهش می‌یابد. بیشترین میزان سایش مربوط به زیرلایه با زبری فوق می‌باشد که پوشش ایجاد شده بر روی آن دارای کمترین سختی است.

منحنی مشخصه سایش پوششهایی که زبری زیرلایه آنها به روش الکتروشیمیایی بوجود آمده‌اند، در شکل ۵ نشان داده شده است تا بدین وسیله تأثیر الکتروپولیش بر رفتار سایشی پوشش کروم سخت نیز مشخص گردد. با اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه‌ها و نیز مشاهدات چشمی، ملاحظه شد که در پوشش با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون تا مسافت لغزش ۳۰۰ متر ذرات سایش تولید شد، از این مسافت به بعد ذرات سایش بسیار کمی تولید شد.

در پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه با زبری ۰/۱۴ میکرون نیز تا مسافت لغزش ۴۰۰ متر ذرات سایش تولید شد و پس از آن با ادامه لغزش، ذرات کمی بوجود آمد. در واقع انتقال از مرحله سایش آبدی به پایدار پس از ۴۰۰ متر مسافت لغزش اتفاق افتاده است. با توجه به شکل ۵ مشخص می‌شود که در تمام مسافتهای لغزش، مقاومت به سایش پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه با زبری ۰/۰۷ میکرون بیشتر از ۰/۱۴ میکرون است.

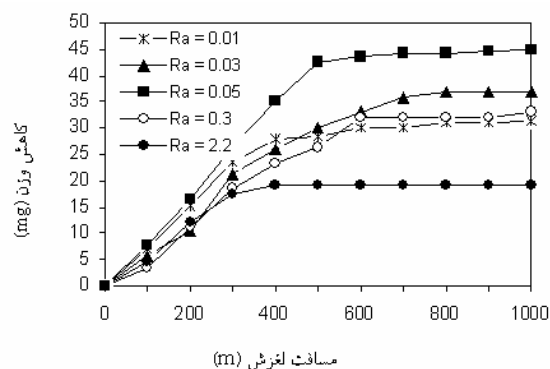
از آنجایی که عامل اصلی مقاومت به سایش خراشان افزایش سختی است [12-3,15] و با توجه به اینکه فرآیند سایش لغزشی در این پژوهش عمدتاً از نوع خراشان است؛ لذا به نظر می‌رسد دلیل اصلی افزایش مقاومت به سایش، افزایش سختی می‌باشد (شکل ۳).

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ مشخص می‌شود که بیشترین مقاومت به سایش در بین تمام پوششها مربوط به پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه با زبری ۰/۰۷ میکرون بوده که این صافی سطح توسط فرآیند الکتروپولیش با جریان منقطع حاصل شده است.

در فرآیند الکتروپولیش با قرار دادن نمونه در آند، لایه‌های سطحی که حاوی تنشهای ناشی از عملیات حرارتی، ماشینکاری و سنگ‌زنی هستند حذف شده و لذا سطحی عاری از تنش قبل از پوشش دهی مهیا می‌شود؛ به طوری که پوشش ایجاد شده بر روی این سطوح نیز دارای تنش داخلی کمتری می‌باشند [16]. از آنجایی که مکانیزم سایش غالب پوشش کروم سخت خستگی می‌باشد [8,17-22] و با توجه به اینکه تنش داخلی نقش موثری در این نوع سایش دارد [3,12-14]؛ لذا به نظر می‌رسد این کاهش تنش داخلی پوشش (در اثر الکتروپولیش زیرلایه) باعث مقاومت به سایش بیشتر پوشش شده است.

می‌دهد. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که منحنی مشخصه سایش پوششها مرحله سایش آبدی و پایدار را از خود نشان می‌دهند. از آنجایی که مقدار نیروی اعمالی کم بوده و پوشش سخت و ضخیم می‌باشد، بنابراین مرحله سوم لغزش یعنی مرحله تخریب پوشش در این نمونه‌ها دیده نمی‌شود.

مشاهدات چشمی و اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه‌ها بعد از هر ۱۰۰ متر مسافت لغزش نشان داد که در پوشش با زبری زیرلایه ۰/۰۱ میکرون پس از ۴۰۰ متر مسافت لغزش ذرات سایش بسیار کمی تولید شد. این موضوع بطور واضح در شکل ۴ دیده می‌شود. در مسافت لغزش ۰ - ۴۰۰ متر منحنی دارای شیب تند می‌باشد که نشان دهنده نرخ سایش بالا و مرحله سایش آبدی (ناپایدار) است [۱۲].



شکل ۴. منحنی مشخصه سایش پوشش‌هایی که زبری زیرلایه آنها به روش مکانیکی ایجاد شده، تحت نیروی ۲kgf و سرعت لغزش ۰/۱ m/s

در پوشش با زبری زیرلایه ۰/۰۳ میکرون پس از ۷۰۰ متر، با زبری زیرلایه ۰/۰۵ میکرون پس از ۵۰۰ متر، با زبری زیرلایه ۰/۰۳ میکرون تقریباً پس از ۶۰۰ متر و با زبری زیرلایه ۲/۲ میکرون پس از ۳۰۰ متر مسافت لغزش ذرات سایش بسیار کمی تولید شد و در واقع مرحله سایش پایدار آغاز گردید.

رسیدن از نرخ سایش بالا به نرخ سایش یکنواخت و کم نشان دهنده انتقال از مرحله سایش آبدی به مرحله سایش پایدار می‌باشد [12].

با توجه به شکل ۲ با کاهش یا افزایش زبری زیرلایه از مقدار ۰/۰۵ میکرون سختی پوشش افزایش می‌یابد و کمترین سختی مربوط به پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه با زبری فوق می‌باشد. از آنجایی که در این پژوهش بررسیهای سایش لغزشی خشک توسط گلوله ساینده آلومینا با سختی بسیار بالاتر از پوشش کروم سخت انجام شده است؛ لذا فرآیند سایش لغزشی عمدتاً از نوع خراشان^۱ می‌باشد.

^۱ - Abrasive

خود نشان داد؛ آزمایش سایش لغزشی در مسافتهای طولانی بر روی آن انجام گرفت.

نتایج حاصل به صورت منحنی مشخصه سایش در شکل ۷ نشان داده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود پس از ۳۰۰ متر مسافت لغزش مرحله سایش پایدار شروع شده و تا مسافت ۵۰۰۰ متر هیچ‌گونه افزایش ناگهانی در نرخ سایش که نشان دهنده شکست پوشش است مشاهده نمی‌شود.

بنابراین این پوشش تحت نیروی اعمالی ۲kgf تا مسافت لغزش ۵۰۰۰ متر پایداری و دوام خوبی از خود نشان می‌دهد

از آنجایی که پوشش مذکور تحت نیروی ۲kgf تا مسافت لغزش ۵۰۰۰ متر دچار شکست نشد؛ لذا آزمایش سایش تحت نیروی ۵ kgf بر روی آن انجام گرفت. نتایج حاصل به صورت منحنی مشخصه سایش در شکل ۸ نشان داده شده که از سه مرحله تشکیل شده است.

مرحله اول از ۰ تا ۳۰۰ متر مسافت لغزش، مرحله سایش آبدی بوده که از نرخ سایش بالایی برخوردار است.

مرحله دوم، مرحله سایش پایدار بوده که پس از این مسافت آغاز شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نرخ سایش در این مرحله تقریباً ثابت است.

شروع مرحله سوم با افزایش نرخ سایش همراه است که به وضوح دیده می‌شود. در این مرحله به طور چشمی مشاهده شد که پوشش در بعضی قسمت‌ها تخریب شده و زیرلایه به خوبی دیده می‌شد.

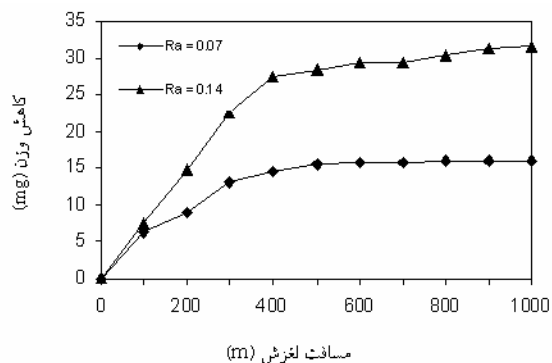
در واقع شکست پوشش در این ناحیه اتفاق افتاده است. این شکست پس از ۱۰۰۰ متر مسافت لغزش جسم ساینده آلومینا بر روی سطح بوقوع پیوست. به طور چشمی مشاهده شد که شکست پوشش سبب افزایش ناگهانی در عمق اثر سایش گردید. این تغییر نشان دهنده شکست پوشش می‌باشد [8].

۳-۳-۳- بررسی مکانیزمهای سایش

به منظور بررسی مکانیزم سایش غالب پوشش با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون که بهترین مقاومت به سایش را از خود نشان داد، تصاویر میکروسکوپی از سطح و مقطع عرضی اثر سایش آن تهیه شد.

شکل ۹ تصویر SEM از سطح اثر سایش پوشش فوق را تحت نیروی ۲kgf پس از ۱۰۰ متر مسافت لغزش نشان می‌دهد. شیارهای موازی بسیاری بر روی سطح مشاهده می‌شود که نشان دهنده سایش خراشان می‌باشد [8,23].

با ادامه لغزش و مشاهده سطوح ساییده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی ملاحظه شد که پوسته‌ای شدن^۱ پوشش در قسمت‌های بسیاری از سطح صورت گرفته است.



شکل ۵. منحنی مشخصه سایش پوششهایی که زبری زیرلایه آنها به روش الکتروشیمیایی ایجاد شده، تحت نیروی ۲ kgf و سرعت لغزش ۰/۱ m/s

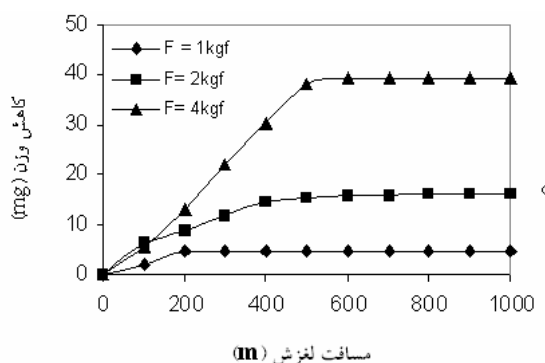
۳-۳-۱- تأثیر افزایش نیروی اعمالی

به منظور بررسی تأثیر نیروی اعمالی بر رفتار تریبولوژیکی پوشش با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون که بهترین رفتار سایشی را تحت نیروی ۲kgf از خود نشان داد، تحت نیروهای ۱ و ۴kgf در سرعت لغزش ۰/۱m/s مورد آزمایش قرار گرفت.

نتایج حاصله در شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش نیروی اعمالی از ۱ تا ۴kgf میزان سایش نیز افزایش می‌یابد.

در تحقیقات انجام شده بر روی بررسی رفتار سایشی زوج پین چدنی و پوشش کروم سخت توسط محققین دیگر نیز نتایج مشابهی ارائه شده است [8].

مرحله سایش پایدار تحت نیروی ۱kgf، پس از ۲۰۰ متر، تحت نیروی ۲kgf پس از ۴۰۰ متر و در نیروی ۴kgf پس از ۵۰۰ متر مسافت لغزش شروع شده است.



شکل ۶. مقایسه رفتار سایشی پوشش کروم سخت با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون (بهترین نمونه از این نظر) تحت نیروهای ۱، ۲ و ۴kgf

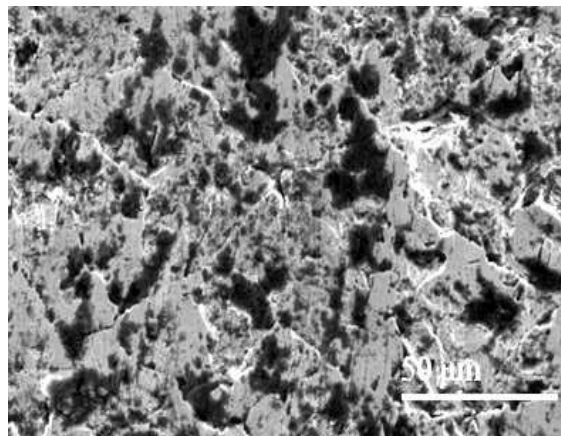
۳-۳-۲- دوام پوشش کروم سخت

به منظور بررسی عمر و دوام پوشش با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون که بهترین مقاومت به سایش را تحت نیروی ۲kgf از

¹ - Spalling

شکل ۱۰ تصویر SEM از سطح اثر ساییش پوشش مذکور را تحت نیروی ۲kgf پس از ۱۰۰۰ متر مسافت لغزش نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود، پوشش کروم بطور موضعی از سطح کنده شده است. نواحی تیره مناطقی از سطح پوشش می‌باشد که پوسته‌ای شدن پوشش در آن اتفاق افتاده است.



شکل ۱۰. تصویر SEM از سطح اثر ساییش پوشش با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون تحت نیروی ۲ kgf پس از ۱۰۰۰ متر مسافت لغزش

شکل ۱۱ تصویر SEM قسمتی از سطح اثر ساییش پوشش مذکور را تحت نیروی ۵kgf پس از ۱۰۰۰ متر مسافت لغزش نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود شکست پوشش اتفاق افتاده و سطح فلز زیرلایه به خوبی مشاهده می‌شود. ناحیه سفید نشان داده شده، جایی است که پوشش تخریب شده و فلز زیرلایه دیده می‌شود.

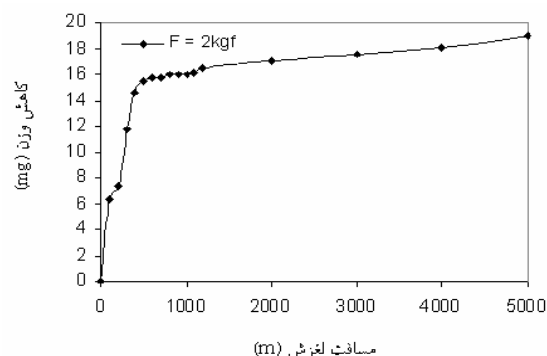
شکل ۱۲ تصویر SEM از مقطع عرضی اثر ساییش همین پوشش را نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود کنده شدن پوشش در قسمت‌هایی از اثر ساییش اتفاق افتاده است.

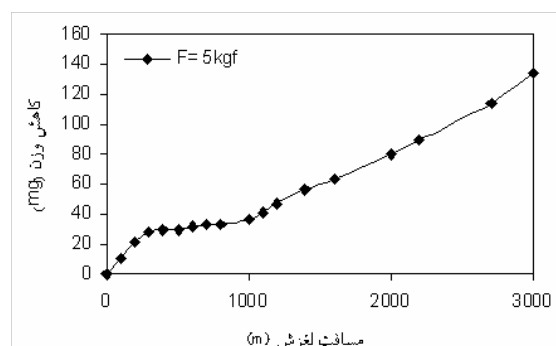
خستگی ناشی از اعمال تنشهای سیکلی در حین ساییش لغزشی گلوله ساینده آلومینا منجر به رشد ریزترک‌های اولیه موجود در پوشش کروم سخت و متصل شدن آنها به یکدیگر شده و نهایتاً باعث پوسته‌ای شدن پوشش شده است [8,17].

شکل ۱۳ تصویر شکل ۱۲ را در بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد. ریزترک موجود در پوشش کروم سخت بطور واضح دیده می‌شود.

ریزترک فوق در اثر افزایش تنش داخلی پوشش که ناشی از تجزیه هیدریدهای کروم به کروم فلزی است، تولید شده است

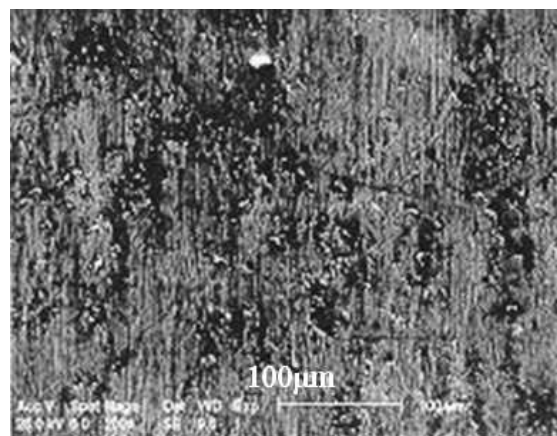


شکل ۷. منحنی مشخصه ساییش پوشش کروم سخت با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون تحت نیروی ۲ kgf و سرعت لغزش ۰/۱ m/s در مسافتهای لغزش طولانی



شکل ۸. سه مرحله ساییش در پوشش کروم سخت با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون تحت نیروی ۵kgf و سرعت لغزش ۰/۱ m/s در مسافتهای لغزش طولانی

در واقع مکانیزم ساییش غالب، خستگی پوشش کروم سخت می‌باشد که دلیل آن اعمال تنشهای سیکلی در حین ساییش لغزشی می‌باشد که منجر به جوانه‌زنی و رشد ترک شده است [8,17-22].



شکل ۹. تصویر SEM از سطح اثر ساییش پوشش با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون تحت نیروی ۲ kgf پس از ۱۰۰ متر مسافت لغزش

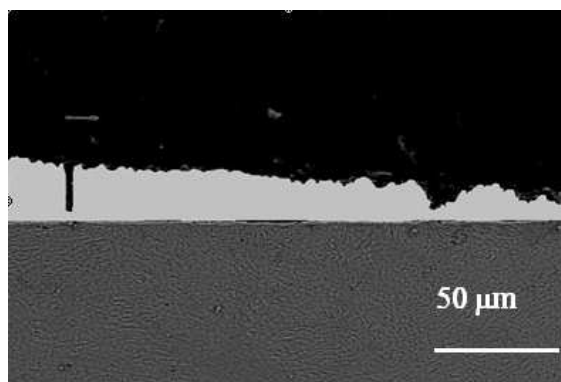
تولید ذرات ساییش زیاد بوده و در نتیجه سطح تماس گلوله سایینده با سطح اثر ساییش به علت قرار گرفتن ذرات فوق بین این دو سطح کاهش می‌یابد. این امر باعث کاهش نیروی اصطکاک و به دنبال آن ضریب اصطکاک می‌گردد.

مرحله دوم که ضریب اصطکاک زیادتر بوده و عمدتاً در محدوده ۰/۷ تا ۰/۸ قرار دارد. در این ناحیه که در مرحله ساییش پایدار در منحنی مشخصه ساییش قرار دارد، ذرات ساییش تولید شده ناچیز بوده و در نتیجه سطح تماس بین گلوله سایینده و سطح اثر ساییش افزایش می‌یابد.

این امر باعث افزایش نیروی اصطکاک و به دنبال آن ضریب اصطکاک می‌گردد. در مراجع نیز به این نکته اشاره شده که در حین لغزش، در اثر مکانیزمهای ساییش ذرات ساییشی تولید می‌شوند که این ذرات تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب اصطکاک دارند. حضور ذره سخت بین سطوح سخت ممکن است در بعضی موارد حتی ضریب اصطکاک را کاهش دهد.

در این حالت ذره ممکن است به عنوان غلطک عمل کرده و باعث کاهش ضریب اصطکاک گردد [3].

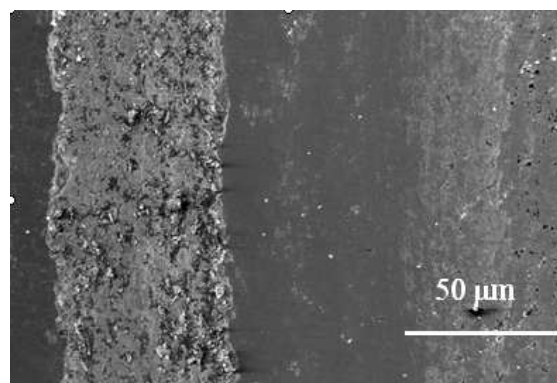
با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که مکانیزم ساییش غالب در ۱۰۰ متر اول مسافت لغزش، خراشان می‌باشد. بنابراین مکانیزم اصطکاک غالب در مرحله اول، خیش خوردن پوشش توسط گلوله سایینده می‌باشد [3].



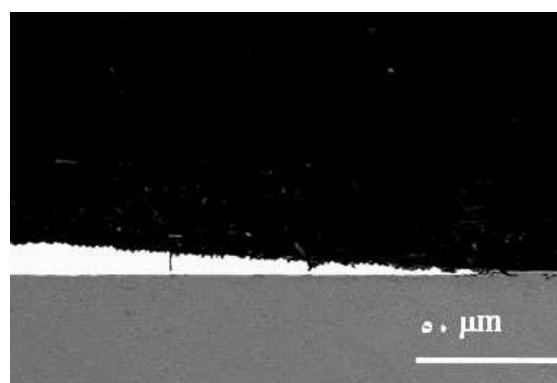
شکل ۱۳. تصویر شکل ۱۲ در بزرگنمایی بالاتر

با توجه به اینکه ترکیبی از مواد سخت و خیلی سخت بر روی یکدیگر می‌لغزند، در پوشش با زبری زیر لایه ۲/۲ میکرون، به علت عدم تغییر شکل الاستیکی یا پلاستیکی بزرگ زیر لایه، جسم لغزنده بر روی نوک تعداد کمی از ناهمواریها حرکت می‌کند [3].

بنابراین سطح تماس بین سطوح کاهش می‌یابد، در این حالت احتمالاً کاهش سطح تماس و قفل شدن ناهمواری مکانیزم اصطکاک غالب می‌باشد. از آنجایی که زبری سطح این پوشش بسیار می‌باشد، ذرات کنده شده از نوک این زبری‌ها در داخل زبری‌های فوق به دام افتاده و تأثیر بسیاری بر اصطکاک نخواهد



شکل ۱۱. تصویر SEM از سطح اثر ساییش پوشش با زبری زیر لایه ۰/۰۷ میکرون تحت نیروی ۵ kgf پس از ۱۰۰۰ متر مسافت لغزش (شکست پوشش اتفاق افتاده و زیر لایه نمایان شده است)



شکل ۱۲. تصویر SEM از مقطع عرضی اثر ساییش پوشش شکل ۱۱ پس از شکست (۱۰۰۰ متر مسافت لغزش)

در ادامه لغزش در اثر خستگی ناشی از اعمال تنشهای سیکلی در حین ساییش لغزشی گلوله سایینده، ریزترک فوق رشد کرده و به ریزترک‌های دیگر موجود در پوشش کروم سخت متصل می‌شود و نهایتاً پوسته‌ای شدن اتفاق خواهد افتاد [8,17].

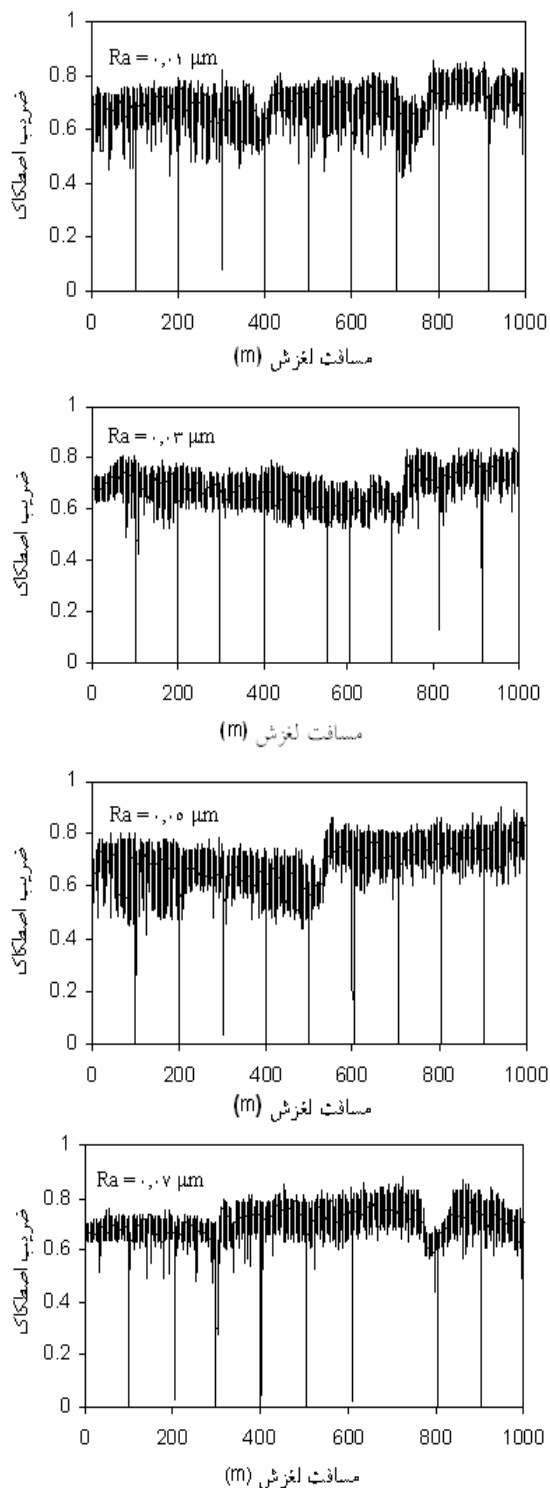
۳-۴- رفتار اصطکاکي پوشش‌ها

به منظور بررسی رفتار اصطکاکي پوشش‌های کروم سخت نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش رسم شد. این نمودارها بطور پیوسته در طول آزمایش بوسیله لودسل و با استفاده از نرم افزار مخصوص رسم شد.

تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای پوششهای با زبری زیر لایه متفاوت در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که منحنی‌های ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش عمدتاً از دو ناحیه تشکیل شده‌اند. مرحله اول که ضریب اصطکاک کمتر بوده و عمدتاً در محدوده ۰/۶ تا ۰/۷۵ قرار دارد. در این ناحیه که در مرحله ساییش آبندی در منحنی مشخصه ساییش قرار دارد،

با توجه به اینکه حضور ذره سخت بین سطوح سخت می‌تواند به عنوان غلطک عمل کرده و باعث کاهش ضریب اصطکاک گردد [3]؛ لذا تولید ذرات سایش بیشتر در بار اعمالی ۴ kgf نسبت به بار ۱ kgf نیز می‌تواند موجب کاهش ضریب اصطکاک و دامنه نوسانات آن شده باشد.



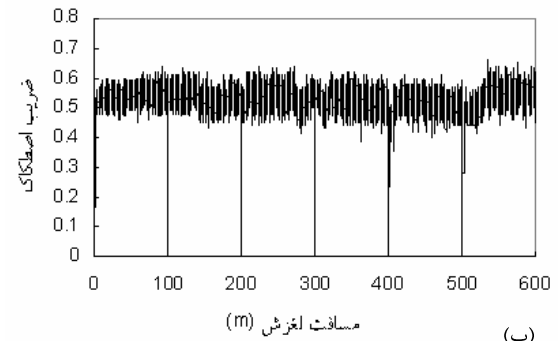
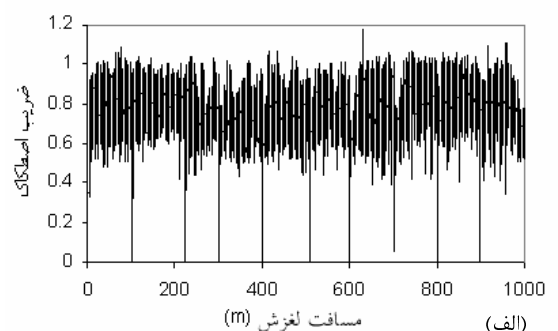
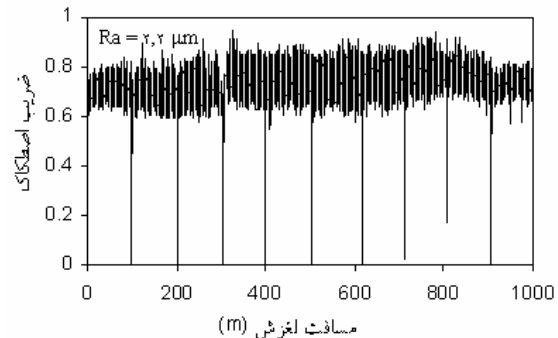
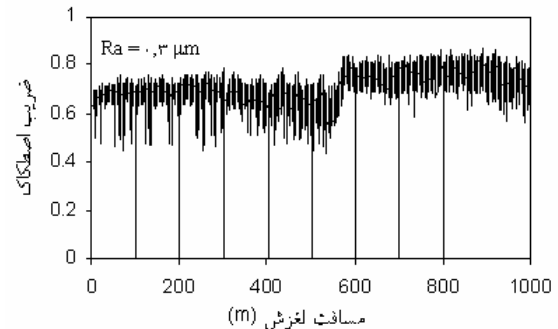
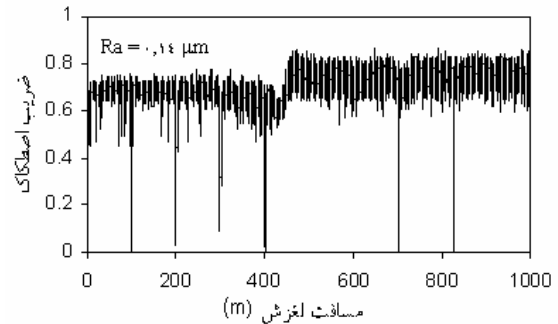
شکل ۱۴. تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای پوششهای با زبری زیرلایه متفاوت تحت بار ۲ kgf و سرعت لغزشی ۰/۱ m/s

داشت. همانطور که در شکل ۱۴ ($R_a = 2/2 \mu\text{m}$) مشاهده می‌شود، تغییر بسیاری در اصطکاک در حین انتقال از مرحله اول به مرحله دوم اصطکاک وجود ندارد. نوک زبری‌ها مانع از حرکت گلوله ساینده می‌شود و بنابراین دامنه تغییرات ضریب اصطکاک در این پوشش وسیعتر می‌شود. رفتار اصطکاکی پوشش کروم با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون تحت نیروهای ۱ و ۴ kgf نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های ۱۵ (الف) و (ب) مشخص می‌شود که ضریب اصطکاک و همچنین دامنه نوسانات آن تحت نیروی ۱ kgf بیشتر از نیروی ۴ kgf است. در نیروی ۱ kgf احتمالاً بدلیل کمتر بودن نیروی اعمالی، ذرات سایش تولید شده در حین فرآیند سایش لغزشی خشک کمتر کار سخت شده و از سختی و استحکام کمتری نسبت به ذرات سایش تولید شده در نیروی ۴ kgf برخوردار می‌باشند. از اینرو در حین سایش تغییر شکل در ذرات مذکور بیشتر بوده و به سطح گلوله بیشتر می‌چسبند؛ در نتیجه نقش غلطک را در کاهش ضریب اصطکاک کمتر بازی می‌کنند. همچنین به علت تغییر شکل و چسبندگی بیشتر ذرات سایش به گلوله ساینده تحت نیروی ۱ kgf پدیده چسبندگی - لغزش در حین سایش نسبت به نیروی ۴ kgf بیشتر اتفاق می‌افتد. این پدیده باعث افزایش ضریب اصطکاک، بویژه دامنه نوسانات آن خواهد شد [5]. با توجه به اینکه حضور ذره سخت بین سطوح سخت می‌تواند به عنوان غلطک عمل کرده و باعث کاهش ضریب اصطکاک گردد [3]؛ لذا تولید ذرات سایش بیشتر در نیروی اعمالی ۴ kgf نسبت به نیروی ۱ kgf نیز می‌تواند موجب کاهش ضریب اصطکاک و دامنه نوسانات آن شده باشد. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که مکانیزم سایش غالب در ۱۰۰ متر اول مسافت لغزش، خراشان می‌باشد. بنابراین مکانیزم اصطکاک غالب در مرحله اول، خیش خوردن پوشش توسط گلوله ساینده می‌باشد [3]. با توجه به اینکه ترکیبی از مواد سخت و خیلی سخت بر روی یکدیگر می‌لغزند، در پوشش با زبری زیرلایه ۲/۲ میکرون، به علت عدم تغییر شکل الاستیکی یا پلاستیکی بزرگ زیرلایه، جسم لغزنده بر روی نوک تعداد کمی از ناهمواریها حرکت می‌کند [3]. بنابراین سطح تماس بین سطوح کاهش می‌یابد، در این حالت احتمالاً کاهش سطح تماس و قفل شدن ناهمواری مکانیزم اصطکاک غالب می‌باشد. از آنجایی که زبری سطح این پوشش بسیار می‌باشد، ذرات کنده شده از نوک این زبری‌ها در داخل زبریهای فوق به دام افتاده و تأثیر بسیاری بر اصطکاک نخواهد داشت. همانطور که در شکل ۱۶ ($2/2 \mu\text{m}$) = R_a مشاهده می‌شود، تغییر بسیاری در اصطکاک در حین انتقال از مرحله اول به مرحله دوم اصطکاک وجود ندارد. نوک زبریها مانع از حرکت گلوله ساینده می‌شود و بنابراین دامنه تغییرات ضریب اصطکاک در این پوشش وسیع تر می‌شود.

مشاهدات چشمی و اندازه‌گیری کاهش وزن پوشش تحت بار ۱ kgf نشان داد که تا انتهای آزمایش تولید ذرات سایش متوقف نشد. بنابراین یک مرحله اصطکاک در منحنی ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش دیده می‌شود. تقریباً در انتهای آزمایش مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک در حال کاهش می‌باشد، دلیل این امر، رسیدن از مرحله اول اصطکاک به مرحله دوم می‌باشد. در همه نمونه‌ها در انتهای مرحله اول اصطکاک، جائیکه تولید ذرات سایش در حال کم شدن می‌باشد، ابتدا ضریب اصطکاک کمی کاهش یافته و سپس به دلیل تولید نشدن ذرات سایش، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. این پدیده را می‌توان بدین صورت تفسیر کرد که در انتهای مرحله اول اصطکاک جائیکه تولید ذرات سایش در حال کم شدن می‌باشد، برخورد و گیرکردن ذرات فوق به یکدیگر کمتر می‌شود. این امر موجب غلطیدن راحت‌تر این ذرات و در نتیجه لغزش آسانتر دو سطح تماس بر روی یکدیگر می‌شود. از اینرو در این حالت این تعداد ذرات سایش نقش بیشتری را در کاهش ضریب اصطکاک ایفا می‌کنند. در ادامه با ورود به مرحله دوم با متوقف شدن تولید ذرات سایش در مرحله سایش پایدار، به دلیل نبودن ذرات سایش بصورت غلطک بین دو سطح و در نتیجه افزایش سطح تماس، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. با مقایسه نمودارهای ضریب اصطکاک برای نمونه فوق تحت بارهای ۱، ۲ و ۴ kgf مشخص می‌شود که با افزایش بار اعمالی ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. ضریب اصطکاک در بار ۱ kgf بین ۰/۶ تا ۰/۹۵، در بار ۲ kgf بین ۰/۶۵ تا ۰/۸ و در بار ۴ kgf بین ۰/۵ تا ۰/۶ نوسان می‌کند. غالباً با افزایش بار اعمالی ضریب اصطکاک کاهش پیدا می‌کند [24].

۴. نتیجه‌گیری

- ۱- زبری سطح پوشش کرم سخت متأثر از زبری زیرلایه بوده و همواره بیشتر از آن است.
- ۲- در حالتی که زبریهای متفاوت بر روی سطح زیرلایه‌ها توسط روش مکانیکی ایجاد شود، کمترین مقاومت به سایش مربوط به پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه با صافی سطح $Ra = 0.05 \mu m$ می‌باشد. با افزایش صافی سطح زیرلایه از مقدار فوق به $Ra = 0.01 \mu m$ و یا با کاهش آن به $Ra = 2.2 \mu m$ مقاومت به سایش پوششهای ایجاد شده بر روی آنها به دلیل افزایش سختی پوشش، افزایش می‌یابد.
- ۳- استفاده از فرآیند الکتروپولیش با جریان منقطع نسبت به جریان مستقیم، صافی سطح بهتری بر روی زیرلایه ایجاد می‌کند؛ و همچنین موجب مقاومت به سایش بیشتر پوششهای ایجاد شده بر روی این سطوح می‌شود.



شکل ۱۵. تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای پوشش با زبری زیرلایه ۰/۰۷ میکرون تحت سرعت لغزش ۰/۸ m/s و بار (الف) ۱ kgf و (ب) ۴ kgf

[8] Gawne, D.T., and Gudyanga, T.P., "Wear Behaviour of Chromium Electrodeposits", in: Coatings and Surface Treatment For Corrosion and Wear Resistance, Ed. K. N. Strafford, Ins. Corr. Sci. & Technol., Ellis. Horwood Limited, England, 1984, PP. 28-45.

[9] Montgomery, M., "Factors Influencing the Durability of Chrome Plate", in: Wear of Materials, Ed. K. C. Ludema, The American society of Mechanical Engineering, 1979, PP.637-639.

[10] ASTM, "Standard Guide for Chromium Electroplating on Steel for Engineering Use", Designation: B177-93.

[11] Ourney, J., "Electroplating Engineering Handbook", Chapman & Hall, London, 4th Edition, 1996.

[12] Bhushan, B., "Modern tribology Hand book", Vol.1,2, 2001.

[13] Allen, K., and Torrance, A. A., "Coating to Improve the Wear Resistance of a Low Alloy Steel", Tribology International, Vol.3, 1986, PP.123-127.

[14] Stachowiak, G.W., and Batchelor, A.W., "Engineering Tribology", Elsevier, Amsterdam, 1993.

[15] Khruschov, M.M., "Resistance of Metal to Wear by Abrasion as Related to Hardness", Proc.Conf. on Lubrication and Wear, Publ. Inst. Mech. Engrs., London, 1967, PP.635-639.

[16] Wiener, M., "Bright Trim is Back", Metal Finishing, Vol. 21, April 1987, PP.51-53.

[17] Rao, Z., "Carbon Implantation into Hard Chrome Coatings", Surface and Coating Technology, Vol. 84, 1996, PP.512-518.

[18] Cote Paul Rickard Christopher, J., "Gas-Metal Reaction Products in the Erosion of Chromium Plated Gun Bores", Wear, Vol. 241, 2000, PP.17-25.

[19] Stobie, I.C., "Screening Gun Tube Coating's Response to Combustion Gases", US Army Ballistic Research Laboratory Tech. Rept. ARBRL-TR-02396, AD-A113 519, Mar. 1982, PP.1-28.

[20] Turley, D.M., and Wilson, B.A., "Chromium Plating of Gun Barrel Sections In A Pumped Through System", Conf. Proc. On Coatings In The Age Of Technology--Expo' 88, Queens Land, Aust., 31May - 3 June 1988; Ed. DSTO, Australasian Ins. Met. Finish., Aust.1988, PP. 7-16.

[21] Turley, D.M., "Erosion Of A Chromium - Plated Tank Gun Barrel", Wear, Vd 131, May 1989, PP. 135-150.

[22] Turley, D.M., and Wilson, B.A., "Development And Characteristics Of Crack - Free Chromium Coatings Produced By Electroplating", Trans. Ins. Metal Finishing, Vol.67, Nov.1989, PP. 104-108.

- ۴- بیشترین مقاومت به سایش در بین تمام پوششها (پوششهایی که زبری زیرلایه آنها به روش مکانیکی و الکتروپولیش ایجاد شده است) مربوط به پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه با صافی سطح $Ra = 0.07 \mu m$ می باشد که این صافی سطح توسط فرآیند الکتروپولیش با جریان منقطع حاصل شده است.
- ۵- در پوشش فوق، مکانیزم سایش غالب در مسافتهای لغزش کوتاه و طولانی به ترتیب خراشان و خستگی می باشد.
- ۶- با افزایش بار اعمالی ضریب اصطکاک و همچنین دامنه نوسانات آن کاهش می یابد.

قدردانی

از آقای دکتر صبور روح اقدم بخاطر ارائه مشاوره های ارزنده در طول تحقیق و همچنین از آقایان مهندس محمودی، مهندس برزگری و مهندس احمدی مدیریت محترم تحقیقات مجتمع جنگ افزار حدید به جهت همکاری و فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی لازم برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می شود.

مراجع

- [1] Lausmann, G.A., "Electrolytically Deposited Hard Chrome", Surface and Coating Technology, Vol. 86-87, 1996, PP. 814 - 820.
- [2] Chen, E.S., "Improved Electrodeposited Low Contraction Chromium", Technical Report ARLCB - TR- 82009, April 1982, PP.1-17.
- [3] Holmberg, K., and Matthews, A., "Tribology of Coatings, Properties, Techniques and Applicatons in Surface Engineering", Engineering tribology, Amsterdam, Vol.28, 1994, PP.92-105.
- [4] Allen, D., and Jones, R., "Eliminating Substrate Defects", Plating and surface finishing, Vol.81, October 1994, PP.14-17.
- [5] Darbeida, A., "Comparative Tribological Study of Chromium Coatings with Different Specific Hardness", Surface and coating technology, Vol. 68/69, 1994, PP.582-590.
- [6] Jiang, J., and Arnell, R. D., "The Effect of Substrate Surface Roughness on the Wear of DLC Coatings", Wear, Vol. 239, 2000, PP.1-9.
- [7] Siu, Jaffee H.W., and Li, Lawrence K.Y., "An Investigation of the Surface Roughness and Coating Thickness on the Friction and Wear Behaviour of Commercial MoS_2 -Metal Coating on AISI 400C Steel", Wear, Vol. 237, 2000, PP.283-287.

[24] Booser, I., and Richard, E., "Tribology Data Hand book", Manuals, etc, CRC Press, N. Y., 1997.

[23] Onate, J. I., and Dennis, J. K., "Tribological Effects Of Nitrogen Implanation On Hard Chromium Coatings", Metal Finishing., Vol.87, 1989, PP. 25-31.