

بررسی و مقایسه خواص سایشی پوششهای کرمی تهیه شده به روش آبکاری مستقیم و پالسی

محمود حیدرزاده سهی

استادیار گروه مهندسی متالورژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

شاهین خامنه اصل

دانشجوی دکترای مهندسی مواد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

سید محمد مهدی هادوی

مرکز تحقیقات - گروه صنایع تسلیحاتی

(تاریخ دریافت ۷۸/۶/۹، تاریخ تصویب ۷۹/۸/۲۱)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از جریان مستقیم و پالسی پوششهای کرمی ترک دار و عاری از ترک تهیه شدند. بررسی سایش پوششها نشان داد که ضرایب اصطکاک و میزان سایش در نمونه های عاری از ترک بیشتر از نمونه های ترک دار است. بررسی های انجام شده نشان می دهد که مکانیزم اصلی سایش در نمونه های ترک دار می تواند سایش خستگی به همراه سایش خراشان باشد که باعث کنده شدن و شکستن پوشش از مناطق پر تنش می شود. در پوشش های عاری از ترک تهیه شده به طریق پالسی نیز به نظر می رسد مکانیزم سایش از نوع چسبان باشد.

واژه های کلیدی: اصطکاک، سایش، آبکاری پالس، کرم سخت، کرم عاری از ترک

مقدمه

فرج را داشته باشد. در برخی از منابع ذکر شده است که مقاومت پوشش های عاری از ترک کرم در حمام نمک ده برابر پوشش های ترک دار است [۲]. در آبکاری الکتریکی محدود کردن تعداد ترکها در پوشش کرم سخت با دو روش امکان پذیر است. روش اول بکارگیری جریان DC با استفاده از محلولهای ویژه آبکاری در محدوده دما و چگالی جریان خاص است و روش دوم استفاده از جریان پالسی^۱ است [۳ و ۴].

جریان پالسی چهارگوش بطور متناوب معکوس^۲ شونده از مناسبترین انواع جریان های پالسی برای آبکاری کرم عاری از ترک است (شکل ۱) [۵]. مکانیزم فرایند پالس و چگونگی ایجاد پوششهای عاری از ترک در منابع متعددی ذکر شده است [۷-۴]. سختی پوششهای پالسی عاری از ترک کرم از پوششهای کرم سخت معمولی کمتر است. یکی از دلایل کاهش سختی پوشش های پالسی تاثیر پالس

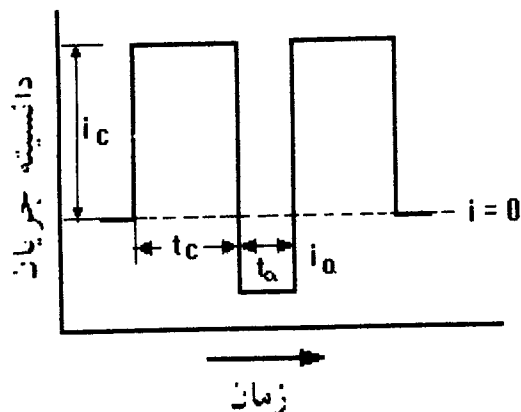
از خواص اصلی پوشش کرم سخت می توان به سختی، مقاومت به سایش، مقاومت در برابر خوردگی و حرارت، ضریب اصطکاک پایین و عدم چسبندگی با مواد، ظاهر خوب و خواص پارامغناطیسی آن اشاره کرد. وجود لایه اکسیدی نازک در سطح پوشش کرم حالت پسیو به سطح می دهد و مانع خوردگی بیشتر این پوشش می شود. به همین دلیل مقاومت به خوردگی کرم در اکثر محیط های شیمیایی خوب است. این پوشش در درجه حرارتهای بالا و محیط های اکسید کننده نیز مقاوم است [۱]. از طرف دیگر وجود ترک در پوشش کرم می تواند باعث رسیدن مواد خورنده به فلز زمینه و ایجاد پیل بین زمینه فلزی و پوشش شود و در نتیجه موجب تشدید خوردگی گردد. بنابر این مقاومت به خوردگی پوشش های کرمی بستگی مستقیم به دانسیته ترک دارد، لذا پوشش کرم برای کاربردهای خوردگی باید کمترین ترک و خلل و

به مکانیزم سایش در پوشش پی برد [۱۴]. در مقایسه با پوشش های کرم سخت (ترک دار)، اطلاعات موجود در باره سایش پوشش های پالسی کرمی عاری از ترک بسیار اندک است. از این رو در این پژوهش سایش پوشش های پالسی عاری از ترک کرم با پوشش های معمولی کرم سخت (ترک دار) مقایسه می شود.

روش تحقیق

ابتدا نمونه هایی به ابعاد $1 \times 2 \times 13$ سانتیمتر از فولاد AISI ۴۳۴۰ با صافی سطح Ra بهتر از ۰/۱ میکرومتر و سختی ۴۰ راکول C (۴۰۰ ویکرز) تهیه شدند. برای ایجاد پوشش های کرمی از یک محلول استاندارد (۲۵۰ گرم بر لیتر اسید کرمیک و ۲/۵ گرم بر لیتر اسید سولفوریک) استفاده شد. دمای محلول در همه آزمایشها ۵۰ درجه سانتیگراد و چگالی جریان اعمالی برای تهیه پوشش به روش DC و چگالی جریان برای شارژ کاتدی در سیکل های پالسی در حد ۴۰ آمپر بر دسیمتر مربع ثابت نگه داشته شد.

برای پوشش کاری از آند سربی با نسبت سطحی آند به کاتد ۱:۱ استفاده شد. این آند درست مقابل نمونه در فاصله ۵ سانتیمتری از کاتد قرار می گرفت.



شکل ۱: سیکل جریان آبکاری پالسی چهارگوش با جریان معکوس.

با توجه به منابع و نتایجی که از تحقیقات قبلی بدست آمده بود [۱۵ و ۱۶]، دو سیکل جریان پالسی مربعی با جریان معکوس PRP (شکل ۱) برای تهیه نمونه های پالسی عاری از ترک انتخاب شد که مشخصات آنها در

بر واکنش آزاد سازی هیدروژن است. گاز هیدروژن با واکنش دادن با کرم تولید هیدریدهای کرم میکند و همین طور به صورت اتمی وارد بلور کرم میشود و با ایجاد اعوجاج در شبکه موجب تنش و افزایش سختی میشود [۸]. در آبکاری پالس هنگام زمان استراحت این امکان بوجود می آید که حباب های هیدروژن تشکیل شده در اطراف کاتد از محلول خارج شوند و فرصتی بوجود می آید که هیدروژن جذب شده از سطح خارج شود [۹].

مطالعات نشان داده است که با استفاده از جریان پالسی با زمان روشن زیر یک دقیقه و زمان معکوس چند سانتی ثانیه می توان به پوشش عاری از ترک رسید و پوشش های پالسی عاری از ترک دارای سختی، صافی سطح و براقیت کمتری نسبت به پوشش های ترک دار هستند [۹ و ۵].

مقاومت به سایش پوشش کرم سخت بخاطر بالا بودن سختی و پایین بودن انرژی سطحی آن بسیار خوب است [۲]. در حقیقت مقاومت به سایش کرم یکی از ویژگی های آن است ولی آن را همانند یک کمیت فیزیکی نمی توان تعریف و اندازه گیری کرد. با توجه به این امر افراد مختلف از آزمایش های مختلف سایش، ضریب سایش های متفاوتی را گزارش کرده اند [۱۰ و ۱۱ و ۱۲].

پوشش کرم سخت معمولی دارای ساختاری با دانه های گنبدی شکل به عرض و ارتفاع ۵ تا ۱۰ میکرومتر است و شبکه ای از ترک روی آن مشاهده می شود. در مرحله اول سایش این پوشش ها هنگامی که هنوز مسافت زیادی از سایش طی نشده است مشاهدات میکروسکوپی نشان می دهند که سطح دانه های گنبدی شکل صاف می شوند ولی کل پوشش دست نخورده باقی میماند. در مراحل بعدی سایش با پیشرفت عمل در اثر تنش اعمالی ترکها گسترش پیدا میکنند، و حفراتی زیر دانه های گنبدی شکل ایجاد می شود. سایش با اشاعه تدریجی ترکها و حفرات ادامه می یابد و دانسیته ترکها با ادامه سایش افزایش خواهد یافت. با به هم پیوستن ترکها و جدایش دانه ها حفراتی ایجاد می شود و دانه ها از سطح کنده می شوند [۱۳]. با بررسی تعداد ترکها در سطح و مقطع و میزان توسعه و اشاعه ترکها در مقطع زیر سایش می توان

جدول (۱) آماده است. یک نمونه از پوشش DC و دو نمونه پوشش پالسی (با کدهای PRP1 و PRP2) مطابق جدول (۱) تهیه شدند. زمان آبرکاری طوری انتخاب شد که ضخامت تمام پوششها در حدود ۸۰ میکرومتر باشد.

جدول ۱: مشخصات جریان آبرکاری نمونه ها.

نمونه	نوع جریان	دانشیه جریان کاتدی (A/dm ²)	دانشیه جریان آنودی (A/dm ²)	زمان روشن (Sec)	زمان معکوس (Sec)	بار کاتدی (کولمب) Qc	بار آنودی (کولمب) Qa	نسبت بار آنودی به بار کاتدی Qa/Qc
DC	ممتد	۴۰	۰	-	-	-	-	۰
PRP1	پالسی	۴۰	۱۰	۳۰	۰/۰۳	۱۲۰۰	۰/۳	۱/۴۰۰۰
PRP2	پالسی	۴۰	۲۰	۱۵	۰/۰۳	۶۰۰	۰/۶	۱/۱۰۰۰

مطالعات سایشی براساس اندازه گیری کاهش وزن نمونه ها پس از سایش، مطالعات میکروسکوپی مقاطع و سطوح ساییده شده و تغییرات ضریب اصطکاک در طول آزمایش سایش انجام گرفت.

آزمایش سایش با استفاده از دستگاه رفت و برگشتی پین روی صفحه انجام شد. با استفاده از این دستگاه مقایسه ای بین مقاومت سایشی پوشش های پالسی و DC انجام گرفت و مکانیزم سایشی در هر مورد مطالعه شد. آزمایش روی پوششهای خشک و تمیز در شرایط آزمایشگاهی معین (۲۱ درجه سانتیگراد و ± 5 درصد رطوبت) صورت گرفت. شکل (۲) تصویر شماتیکی از قسمت ساییده دستگاه سایش را نشان می دهد. پین استوانه ای بکار رفته در این آزمایش ها از فولاد بلیرینگ ۵۲۱۰۰ به قطر ۵ میلیمتر و محل تماس آن با پوشش به شکل نیم کره بود. سختی پین ۶۳ تا ۶۴ راکول C (780 ویکرز) و سرعت انجام سایش یک سیکل بر ثانیه یا ۰/۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. بارهای بکار رفته در این آزمایش ها ۴۵، ۹۰، ۱۵۰، ۲۱۰ نیوتن بودند. سایش تا مسافت ۵۰۰ متر یا به عبارتی ۲۵۰۰ سیکل تحت هریک از بارها انجام شد.

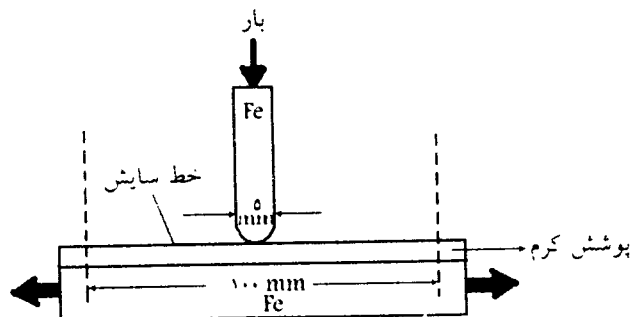
نتایج و بحث

جدول (۲) نتایج بررسی های ظاهری و سختی نمونه ها را نشان می دهد. پوشش های ایجاد شده به طریقه پالس رنگ خاکستری و تیره دارند و پوشش ایجاد شده توسط جریان DC براق است. مقایسه بین نمونه های PRP1 و PRP2 نیز نشان می دهد که نمونه PRP1 رنگ روشن تری از نمونه PRP2 دارد.

جدول ۲: وضعیت ظاهری و سختی پوشش ها.

نمونه	وضعیت ظاهری	سختی (HV _{۰.۰۵})
DC	براق	۸۷۵
PRP1	خاکستری	۷۳۰
PRP2	خاکستری	۶۶۵

همان طور که انتظار می رفت سختی نمونه های پالسی کمتر از نمونه DC است که علت این تفاوت در بخش قبلی توضیح داده شد. پوشش PRP2 سختی کمتری از پوشش PRP1 دارد چون سیکل جریان بکار رفته در پوشش PRP2 بار آنودی به بار کاتدی بیشتر و زمان روشن کمتری نسبت به سیکل جریان بکار رفته در



شکل ۲: شمایی از سیستم سایشی پین روی صفحه.

تهیه شده توسط جریان مستقیم است [۱۱].

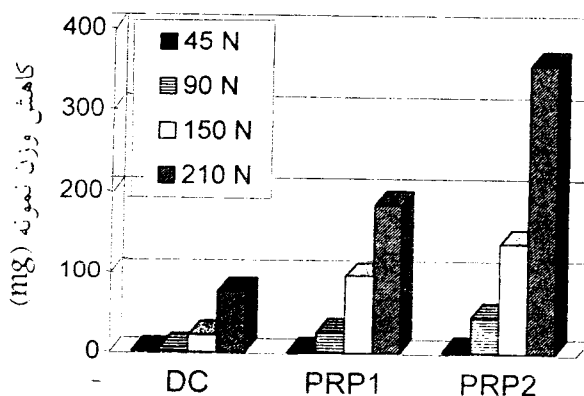
جدول ۳: دانسیته ترک پوششهای مختلف قبل و بعد از سایش.

نمونه	بار سایش	دانسیته ترک قبل از سایش سانتیمتر/ترک	دانسیته ترک بعد از سایش سانتیمتر/ترک
DC	۱/۵	۳۵۰	۱۱۰
	۹		۱۸۰
	۱۵		۵۶۰
	۲۱		۸۱۰
PRP1	۱/۵	۴۰	۸۰
	۹		۱۲۰
	۱۵		۲۰۰
	۲۱		۲۲۰
PRP2	۱/۵	-	-
	۹		-
	۱۵		-
	۲۱		-

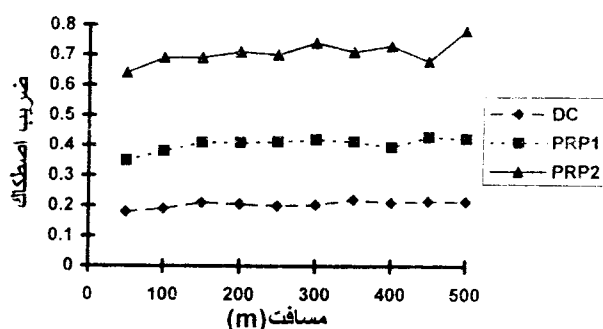
جدول (۳) تغییرات دانسیته ترک (میانگین ۵

اندازه گیری) در پوششها و شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) تصاویر SEM از سطح نمونه‌ها قبل و بعد از سایش آنها در بارهای مختلف را نشان می‌دهند. مقایسه شکل (۵-الف) و (۵-ب) نشان می‌دهد که پوشش DC تحت بار ۴۵ نیوتن سایش ناچیزی را از خود نشان می‌دهد و فقط برجستگی‌های سطحی تا حدی صاف شده‌اند. در تصاویر بعدی (۵-ج) و (۵-د) مشاهده می‌شود که با افزایش بار و به عبارتی تنش ترک‌هایی در اطراف برجستگی‌ها شروع به ظهور و رشد میکنند تا حدی که این برجستگی‌ها حتی کنده میشوند و همین‌طور این مکانیزم ادامه می‌یابد. یعنی ترکها در قسمتهای پر تنش زیاد می‌شوند (جدول ۳) و بالاخره باعث کنده شدن و شکستن پوشش می‌شوند (شکل ۵-ه). نهایتاً "یک سطح خشن و ترک دار" بوجود می‌آید. افزایش بار در یک مسافت ثابت و یا افزایش مسافت یا زمان سایش در یک بار ثابت هر دو باعث تشدید سایش می‌شوند و تقریباً عملکرد مشابهی دارند. این موضوع از مقایسه سطوح ساییده شده نمونه DC در این آزمایش‌ها و نتایجی که گاوان و همکارانش [۱۳] از مراحل مختلف سایشی که با افزایش مسافت تحت یک بار ثابت انجام داده‌اند قابل استنتاج است. مکانیزم سایش در پوششهای کرم سخت را می‌توان ترکیبی از چند مکانیزم اصلی مثل مکانیزم چسبان، خراشان و خستگی دانست. در واقع این‌طور به نظر میرسد که در بارهای کم سایش چسبان موجب بار برداری از سطح برآمدگیها میشود. با

پوشش PRP1 دارد که این عوامل باعث شده پوشش PRP2 کم تنش تر از PRP1 باشد و سختی کمتری داشته باشد [۶]. نتایج حاصل از آزمایش‌های سایش و اصطکاک به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند. شکل (۳) نشان می‌دهد که در یک بار ثابت میزان سائیدگی نمونه PRP2 بیشتر از نمونه PRP1 و آن هم بیشتر از نمونه DC است. در این نمودار همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نیرو میزان سایش پوشش‌ها نیز افزایش می‌یابد و در نیروهای کم، سایش حتی برای نمونه PRP2 نیز ناچیز است.



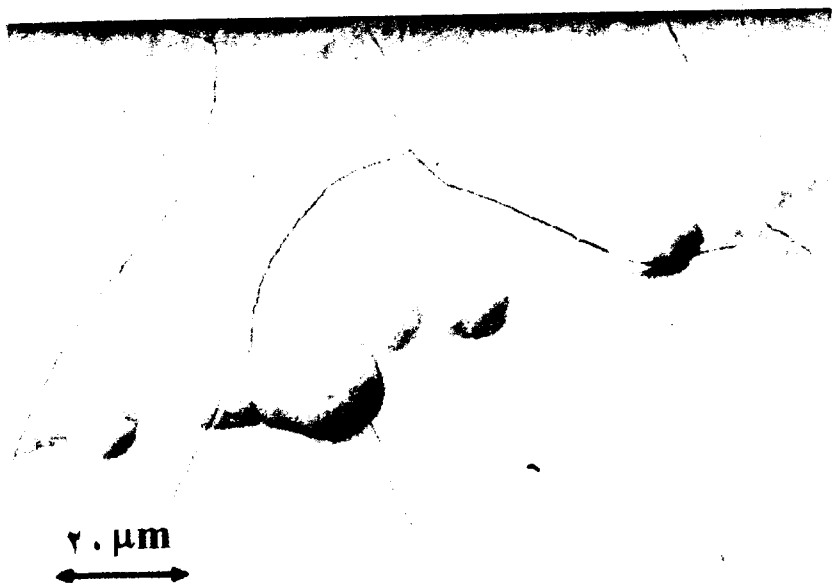
شکل ۳: میزان سایش برحسب کاهش وزن برای پوششها در بارهای مختلف.



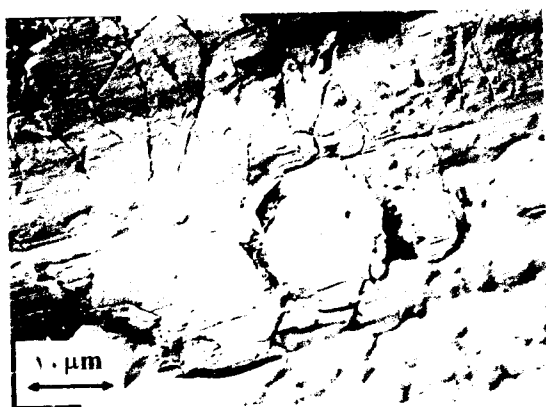
شکل ۴: متوسط ضریب اصطکاک در طول آزمایش سایش (تحت بار ۴۵ نیوتن).

همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود کاهش

وزن نمونه DC خیلی کمتر از نمونه‌های PRP1 و PRP2 است. سطح واقعی تماس کم و سختی زیاد پوشش باعث زیاد بودن مقاومت به سایش و دوام پوشش کرم سخت



(الف)



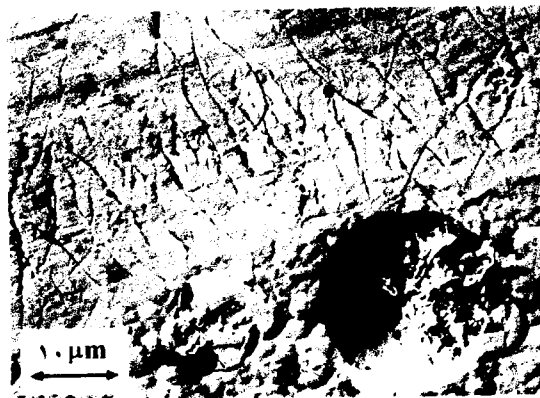
(ب)



(ج)

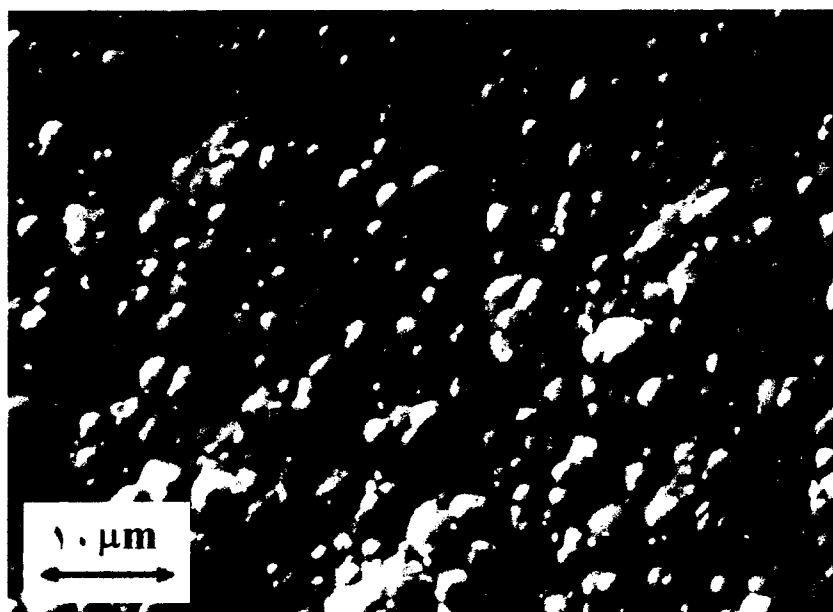


(د)



(ه)

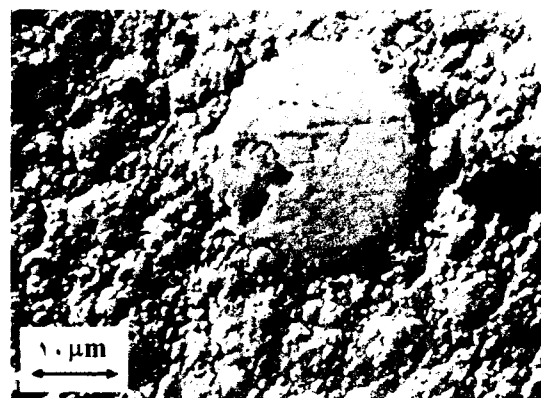
شکل ۵: تصویر از سطح نمونه DC الف (قبل از سایش، ب) ساییده شده با بار ۴۵ نیوتن، ج) ساییده شده با بار ۹۰ نیوتن، د) ساییده شده با بار ۱۶۵ نیوتن، ه) ساییده شده با بار ۲۹۰ نیوتن.



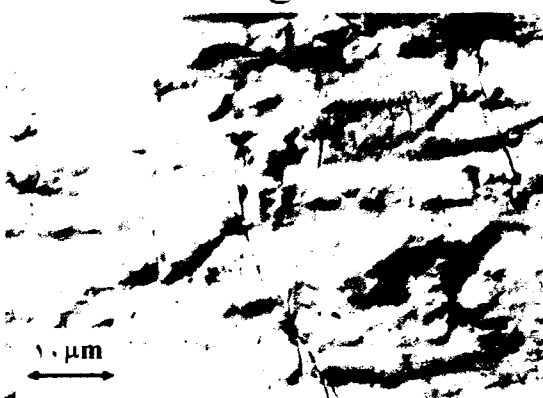
(الف)



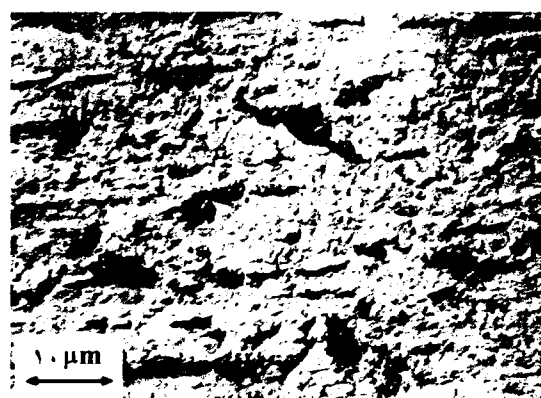
(ج)



(ب)

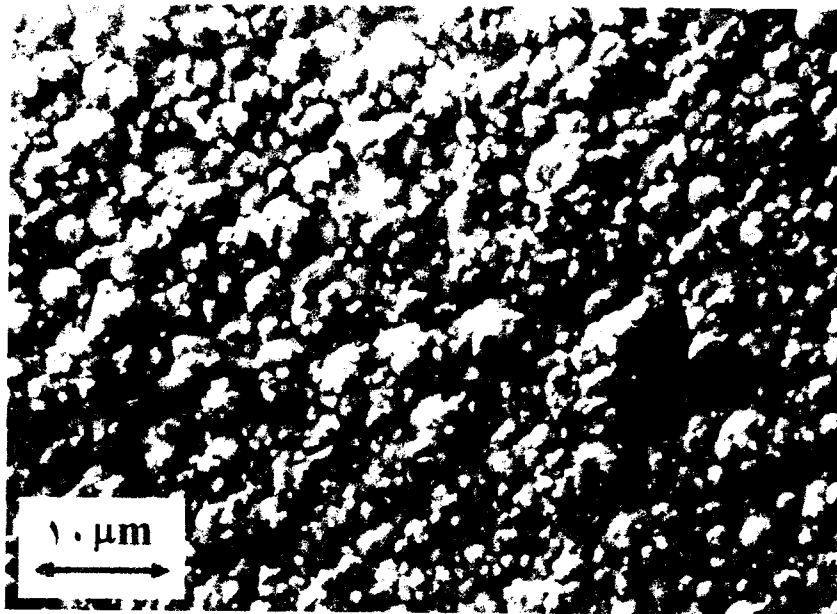


(ه)

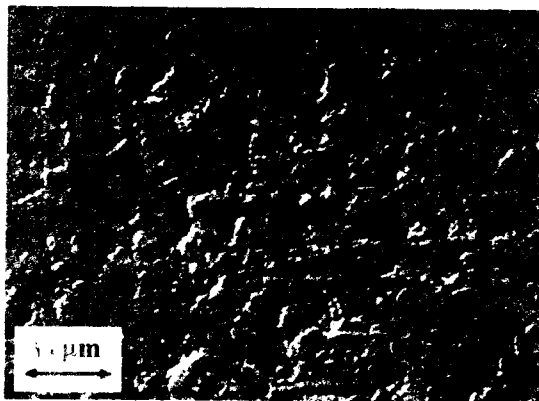


(د)

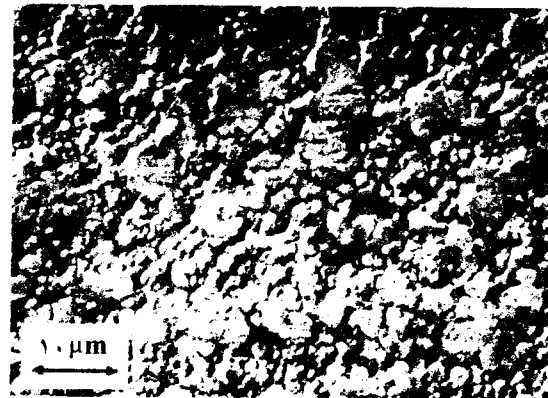
شکل ۶: تصویر از سطح نمونه PRP1 (الف) قبل از سایش، (ب) ساییده شده با بار ۴۵ نیوتن، (ج) ساییده شده با بار ۹۰ نیوتن، (د) ساییده شده با بار ۱۵۰ نیوتن، (ه) ساییده شده با بار ۲۱۰ نیوتن.



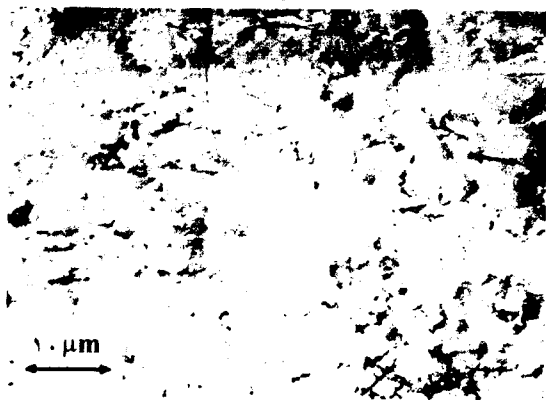
(الف)



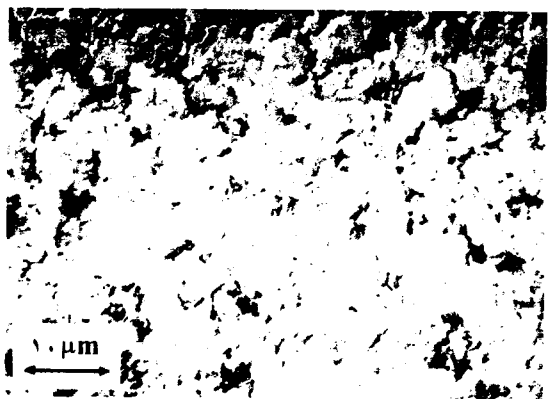
(ج)



(ب)



(ه)



(د)

شکل ۷: تصویر از سطح نمونه PRP2 الف (قبل از سایش، ب) ساییده شده با بار ۴۵ نیوتن، ج) ساییده شده با بار ۹۰ نیوتن، د) ساییده شده با بار ۱۵۰ نیوتن، ه) ساییده شده با بار ۲۱۰ نیوتن.

تغییرات ضریب اصطکاک با مسافت طی شده در حین سایش برای پوشش‌ها نیز در شکل (۴) ارائه شده است. در این نمودار مشاهده میشود متوسط ضریب اصطکاک برای نمونه DC تقریباً ثابت و در حدود ۰/۲ است. تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه PRP1 در این شکل نشان دهنده یک متوسط ضریب اصطکاک در حدود ۰/۴ است. تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه PRP2 نیز در شکل (۴) نشان داده شده است، متوسط ضریب اصطکاک برای این پوشش در حدود ۰/۷ است.

ضریب اصطکاک می‌تواند به عوامل مختلفی وابسته باشد. در این آزمایش‌ها به نظر می‌رسد ضریب اصطکاک وابسته به سختی پوشش‌ها باشد. هر چه پوشش نرم‌تر باشد تحت بار اعمال شده، پایین سطح واقعی تماس بیشتری با پوشش می‌تواند داشته باشد. افزایش سطح واقعی تماس می‌تواند موجب افزایش اصطکاک شود [۱۴].

نتیجه گیری

- ۱- میزان سایش پوشش در نمونه‌های عاری از ترک پالسی بیشتر از نمونه ترک دار DC است.
- ۲- به نظر می‌رسد مکانیزم اصلی سایش در نمونه‌های ترک دار از نوع خستگی و خراش باشد که باعث کنده شدن و شکستن پوشش از مناطق پر تنش می‌شود.
- ۳- در نمونه‌های عاری از ترک به نظر می‌رسد مکانیزم سایش چسبان حاکم باشد که این می‌تواند بخاطر بالا بودن سطح واقعی تماس به دلیل نرم بودن پوشش باشد.
- ۴- ضریب اصطکاک در نمونه‌های عاری از ترک پالسی بیشتر از نمونه‌های ترک دار DC است.

افزایش بار و به عبارتی اعمال تنش برشی بیشتر علاوه بر مکانیزم چسبان، اشاعه ترک در محل‌هایی که تمرکز تنش در آن محلها بیشتر است مثل اطراف برآمدگیها و کنده شدن این برآمدگیها میتواند ناشی از یک مکانیزم خستگی باشد. ذرات کنده شده از پوشش و احتمالاً ذرات اکسیدی سختی که در اثر سایش تولید میشوند هم می‌توانند عامل مکانیزم خراشان باشند. با توجه به مطالب ذکر شده و نتایجی که گاون بدست آورده است [۱۴]، مشاهده می‌شود که هر سه مکانیزم سایش در مورد پوشش DC وجود دارد ولی به نظر می‌رسد مکانیزم‌های خستگی و خراشان در بارهای سایشی بالا تاثیر بیشتری دارند.

مطالعه مکانیزم سایش در پوشش PRP2 که بیشترین مقدار سایش را از خود نشان داده است توسط بررسی شکل‌های (۷-الف) الی (۷-ه) امکان پذیر است. این پوشش هنگامی که تحت سایش قرار می‌گیرد، ترک در آن ایجاد نمی‌شود (جدول ۳) و فقط له شدگی پوشش و صاف شدن آن مشاهده می‌شود و مکانیزم سایش چسبان به نظر می‌رسد.

نتایج بدست آمده از سایش نمونه PRP1 نشان دهنده یک حالت میانی از نمونه DC و PRP2 است. سختی این پوشش قدری بالاتر از پوشش PRP2 است (جدول ۲) و ساختار آن قدری درشت تر از ساختار PRP2 است. همین عوامل ساختار را مستعد ترک دار شدن در حین سایش میکند. با توجه به تصاویر (۶-الف) الی (۶-ه) که محل سایش یافته این پوشش در بارهای مختلف را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که با وجود یک حالت له شدگی در نمونه، ترک و اشاعه ترک در اثر افزایش بار در حین سایش نیز در این پوشش قابل مشاهده است.

مراجع

- 1 - Greenwood, J. D. (1989). *Hard chromium plating*, Mc- Graw Hill.
- 2 - Kohl, M. (1991). *A process for the direct or indirect electro- deposition of a highly corrosion resisting crack-free technical hard chromium plating layer*. UK Patent GB 2236763 A.

- 3 - Colombini, C. (1992). "The use of pulse rectifiers in anidizing and plating." *Met. Finish.*, PP. 31-36.
- 4 – Soddington, J. C. And Hoey, G. R. (1974). "Crack free chromium from conventional plating baths." *Plating*, PP. 923-930.
- ۵- خامنه اصل، ش. "تهیه و بررسی خواص پوششهای کرم سخت با استفاده از جریان مستقیم و منقطع." پایان نامه کارشناسی ارشد، مرداد (۱۳۷۷).
- ۶- خامنه اصل، ش.، حیدرزاده سهی، م. و هادوی، م. م. "تهیه و بررسی پوششهای عاری از ترک کرم سخت با استفاده از جریان پالس." دومین سمینار انجمن مهندسين متالورژی ایران، ص ۵۶۳-۵۶۷، مهر (۱۳۷۷).
- 7 – Ibl, N. and Puipe, C. (1980). "Some theoretical aspect of pulse electrolysis." *Surf. Teac.* No.10, PP. 88-102.
- 8 - Tasi, R. Y. (1991). "Influence of pulse plating on the crystal structure and orientation of chromium." *Finish*, Vol. 138, PP. 124-137.
- 9 - Leisner, P. and Nelsen, G. B. (1993). "Current efficiency and crystallization mechanism in pulse plating of hard chromium." *J. App. Elec. Chem.*, No. 23, PP. 72-78.
- 10 - Drbeida, A., Stebut, J. V., Barthole, M., Belliard, P., Lelait, L. And Zacharic, G. (1994). "Comparative tribological study of chromium coatings and different specific hardness." *Surf. Coat. Tech.*, No. 68/69, PP. 390-582.
- 11 – Anate, J. I. and Denis, J. K. (1989). "Tribological effects of nitrogen implantation on hard chromium coating." *Met. Finish.*, PP. 25-31.
- 12 - Montgomery, R. S. (1987). "Friction of gliding metal sliding on chromium - plated steel." *Wear*, PP. 387-392.
- 13 – Gawne, D. T. and Gudyanga, T. F. P. (1984). "Wear behaviour of chromium electrodeposits." *Coatings And Surface Tretment For Corrosion And Wear Resistance*, Editions: K.H.Strafford, P.K.Datta, PP. 28-45 .
- 14 – Arieta, F. G. and Gawne, D. T. (1995). "The wettability and durability of chromium plating." *Surf. Coat. Tech.*, No.73, PP. 1۰5-110.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 – Pulse Current
- 2 – Periodic Reverse Square Pulse Current
- 3 – Pulse Reverse Polarity

