بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

بررسی تجربی اثرات پارامترهای مختلف بر رفتار زمان گذار سایش تحت روانکاری با روغن آمیخته به نانو ذرات

محمد مهدی‌زاده

اساتید راهنما

دکتر صالح اکبرزاده **دکتر کیقباد شمس**

برخود لازم می‌دانم که از توجه و راهنمایی و تشویق دکتر صالح اکبرزاده،

دکتر کیقباد شمس و دکتر مهدی صالحی صمیمانه تقدیر و تشکر کنم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

پدرم به استواری کوه

و

مادرم به زلالی چشمه

فهرست مطالب

عنوان شماره صفحه

فصل اول : مقدمه ٤

۱-۱. پیش گفتار ۴

۱-۲. سایش و ساز و کارهای آن ۵

۱-۲-۱. انواع سایش ۵

۱-۳. کارهای انجام گرفته در مورد زمان گذار سایش ۷

۱-۴. آزمونهای متعارف(استاندارد) در تریبولوژی ۹

۱-۴-۱. دستگاه اندازهگیری سایش چهار گوی ۱۲

۱-۴-۲. دستگاه سایش بلاک روی حلقه ۱۵

۱-۴-۳. دستگاه سایش با نوسان خطی فرکانس بالا ۱۶

۱-۴-۴. دستگاه سایش دیسک دوقلو ۱۷

۱-۴-۵. دستگاه اندازهگیری سایش پین روی دیسک ۱۸

فصل دوم : روانکاری ۲۰

۲-۱. پیش گفتار ۲۰

۲-۲. روانکارها و اصول روانکاری ۲۲

۲-۲-۱. انواع روانکار ۲۲

۲-۲-۲. روغن پایه برای روانکاری ۲۳

۲-۲-۳. انواع رژیم روانکاری ۲۴

۲-۳. مواد افزودنی به روغن ۲۶

۲-۳-۱. نانو ذرات فلزی ۲۷

۲-۴. روش های تهیه و پایداری نانوسیال ۳۵

۲-۴-۱. روش تهیه یک مرحله‌ای ۳۵
۲-۴-۲. روش تهیه دو مرحله‌ای ۳۵

فصل سوم : شبکه‌های عصبی ۳۹

۳-۱. پیش‌گفتار ۳۹
۳-۲. مدل یک سلول عصبی مصنوعی ۴۰
۳-۲-۱. مدل تک ورودی ۴۰
۳-۲-۲. مدل چند ورودی ۴۱
۳-۳. انواع توابع انتقال ۴۲
۳-۳-۱. تابع محرک خطی ۴۲
۳-۳-۲. تابع محرک سیگموئید- لوجستیک ۴۲
۳-۳-۳. تابع محرک هیپربولیک – تانژانت ۴۳
۳-٤. شبکه‌های عصبی پرسپترون ۴۴
۳-۵. شبکه پیشخور تک لایه ۴۴
۳-۶. شبکه پیشخور چند لایه ۴۵
۳-۷. الگوریتم آموزش پس انتشار خطا ۴۶
۳-۷-۱. مراحل آموزش الگوریتم پس انتشار خطا استاندارد ۴۷
۳-۷-۲. الگوریتم آموزش BP ۴۸
۳-۷-۳. الگوریتم پس انتشار خطای بهبود پذیر (RPROP) ۴۹

فصل چهارم : مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌ها ۵۱

۴-۱. پیش‌گفتار ۵۱
۴-۲. دستگاه سایش مورد استفاده در آزمایش‌ها ۵۱
٤-۳. آماده‌سازی نمونه‌های مورد تست ۵۳

۴-۳-۱. جنس نمونه‌های سایشی ۵۳
۴-۴. ابعاد نمونه های مورد تست ۵۳
۴-۵. پارامترهای سایش ورودی در فاز اول ۵۴
۴-۵-۱. روانکار مورد استفاده در فاز اول ۵۸
۴-۶. پارامترهای سایش ورودی در فاز دوم ۵۹
۴-۶-۱. روانکار مورد استفاده در فاز دوم ۵۹
۴-۶-۲. مراحل تهیه نانو روانکارها ۶۰
۴-۷. پارامترهای سایش خروجی در زمان گذار ۶۵

فصل پنجم : مدل‌سازی تماس در دستگاه پین بر روی دیسک ۷۱

۵-۱. پیش گفتار ۷۱
۵-۲. مختصات هندسی اثر تماس ۷۲
۵-۳. محاسبه ضخامت فیلم روغن ۷۵
۵-۴. جزء زبری‌ها ۷۸
۵-۵. نیروی تحمل شده توسط زبری‌ها ۸۰
۵-۶. محاسبه ضریب اصطکاک ۸۲

فصل ششم : نتایج، تجزیه و تحلیل ۸۶

۶-۱. پیش گفتار ۸۶
۶-۲. تحلیل فاز اول ۸۶
۶-۲-۱. نتایج حاصل از آزمایش‌ها ۸۶
۶-۲-۲. تکرار پذیری نتایج آزمایش‌ها ۸۸
۶-۲-۳. بررسی رژیم روانکاری در زمان گذار سایش ۸۹
۶-۲-۴. روش حداقل مربعات ۹۰

۶-۲-۵. روابط تجربی بر اساس روش حداقل مربعات ۹۱
۶-۳. تحلیل نتایج با استفاده از شبکه عصبی ۹۶
۶-۳-۱. تعیین نوع شبکه مورد استفاده و الگوریتم آموزش..... ۹۷
۶-۳-۲. میانگین مربعات خطا ۹۷
۶-۳-۳. ضریب همبستگی بین خروجی‌های حقیقی و دلخواه..... ۹۸
۶-۳-۴. توپولوژی شبکه عصبی مورد استفاده در این پروژه و بهینه سازی ساختار شبکه اولیه ۹۹
۶-۴. تحلیل فاز دوم ۱۰۳
۶-۴-۱. نتایج حاصل از آزمایش‌ها ۱۰۳
۶-۴-۲. تاثیر نانو روانکارها بر پارامترهای سایش ۱۰۶
۶-۵. نتایج شبیه سازی دستگاه پین بر روی دیسک..... ۱۱۳
۶-۵-۱. ضریب اصطکاک..... ۱۱۴
۶-۵-۲. کاهش وزن نمونه ۱۱۶

فصل هفتم : نتیجه‌گیری ۱۱۸

۷-۱. نتیجه‌گیری ۱۱۸
۷-۲. پیشنهادها ۱۱۹

مراجع ۱۱٤

فهرست جداول

عنوان **شماره صفحه**

جدول۱-۱. استانداردهای آزمایش برای دستگاه چهار گوی[۲۱]..... ۱۴

جدول۱-۲. استانداردهای آزمایش برای دستگاه بلاک روی حلقه[۲۱] ۱۶

جدول۲-۱. مقایسه قطر سایش در روغن با و بدون افزودنی بورات روی[۴۹] ۳۰

جدول۲-۲. اثر عامل پراکنده کننده بر روی خواص روانکاری روغن همراه با نانو ذرات اکسید آهن[۵۲] ۳۱

جدول۲-۳. نتایج آزمایش تریبولوژی مس تولید شده با گازهای مختلف[۵۷] ۳۴

جدول۴-۱. مقادیر مختلف پارامترهای ورودی دستگاه سنگ مغناطیسی..... ۵۶

جدول۴-۲. مشخصات روغن SN500 (روغن پایه استفاده شده در پروژه حاضر)..... ۵۸

جدول۴-۳. مشخصات نانو ذره ZNO مورد استفاده در پروژه [۶۴]..... ۵۹

جدول۴-۴. مشخصات نانو ذره CUO مورد استفاده در پروژه [۶۴]..... ۶۰

جدول۴-۵. درصد وزنی حضور نانوذرات در روانکار پایه در هر ۱۰۰ گرم روانکار..... ۶۱

جدول۵-۱. مشخصات هندسی اثر تماس پین بر روی دیسک[۶۶]..... ۷۴

جدول۵-۲. مقادیر عددی مربوط به همگرا شدن نسبت‌های $\pm/s$ و $\pm_s \boldsymbol{h\sigma}/d_e$ [76]..... ۷۶

جدول۶-۱. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در فاز اول ۸۷

جدول۶-۲. نتایج آزمایش‌های انجام شده برای نشان دادن تکرار پذیری نتایج فاز اول ۸۹

جدول۶-۳. نتایج مربوط به ضریب همبستگی مربوط به مسافت طی شده در زمان گذار ۱۰۱

جدول۶-۴. نتایج مربوط به ضریب همبستگی مربوط به کاهش وزن سایشی ۱۰۱

جدول۶-۵. نتایج مربوط به ضریب همبستگی مربوط به ضریب اصطکاک ۱۰۳

جدول۶-۶. نتایج خروجی از تست‌های سایشی با نانوروانکارها ۱۰۵

جدول۶-۷. مشخصات روان‌کار استفاده شده در مدل‌سازی ۱۱۴

جدول۶-۸ مشخصات سطح استفاده شده در مدل‌سازی ۱۱۴

جدول۶-۹. داده‌های مربوط به مقایسه سهم زبری در ضریب اصطکاک و جرم سایش..... ۱۱۶

فهرست اشکال

عنوان **شماره صفحه**

شکل۱-۱. سیستم شبیه سازی یک تریبومتر ساده[۱۶] ۱۰

شکل۱-۲. دستگاه آزمایش سایش چهار گوی[۲۰] ۱۳

شکل۱-۳. دستگاه آزمایش سایش بلاک روی حلقه[۲۲] ۱۵

شکل۱-۴. دستگاه آزمایش سایش دیسک دوقلو[۲۵] ۱۸

شکل۱-۵. شماتیک دستگاه پین روی دیسک[۲۶] ۱۹

شکل۲-۱. نمودار استرایبک برای شناسایی رژیم روانکاری ۲۶

شکل۲-۲. نمودار وابستگی زمانی نیروی اصطکاک برای روغن و روغن همراه با نانو ذرات MOS_2 [۴۵] ۲۸

شکل۲-۳. اثر مقدار اکسید تیتانیوم بر ظرفیت بار پذیری[۴۶] ۲۹

شکل۲-۴. نمودار قطر سایش بر حسب درصد وزنی افزودنی[۵۳] ۳۲

شکل۳-۱. مدل ریاضی یک نرون تک ورودی [۶۶] ۴۰

شکل۳-۲. یک نرون با چند ورودی [۶۶] ۴۱

شکل۳-۳. تابع محرک خطی [۶۷] ۴۲

شکل۳-۴. تابع محرک سیگموئید- لوجستیک [۶۷] ۴۳

شکل۳-۵. تابع محرک هیپربولیک - تانژانت ۴۳

شکل۳-۶. ساختار شبکه‌های پرسپترون [۶۹] ۴۴

شکل۳-۷. یک شبکه پیشخور تک لایه [۷۰] ۴۵

شکل۳-۸. شماتیک یک شبکه پرسپترون چند لایه [۷۰]..... ۴۶

شکل۴-۱. نمایی از دستگاه پین بر روی دیسک دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان..... ۵۲

شکل۴-۲. نمودار خروجی دستگاه پین بر روی دیسک مربوط به ضریب اصطکاک..... ۵۳

شکل۴-۳. نمونه‌ای از دیسک فلزی مورد تست..... ۵۴

شکل۴-۴. نمونه‌ای از دیسک فلزی مورد تست همراه دیوار پلی‌اتیلن ۵۴

شکل۴-۵. دستگاه سنگ مغناطیسی ۵۶

شکل۴-۶. نمایی از دستگاه زبری‌سنج..... ۵۷

شکل۴-۷. خروجی دستگاه زبری‌سنج (الف) مربوط به زبری ۰/۳ میکرومتر، (ب)مربوط به زبری ۰/۹ میکرومتر و (پ)مربوط به زبری ۱/۵ میکرومتر ۵۸

شکل۴-۸. نمایی از سه نمونه قطعه سایش با کیفیت سطح متفاوت (I) مربوط به زبری ۱/۵ میکرومتر، (II)مربوط به زبری ۰/۹ میکرومتر و (III)مربوط به زبری ۰/۳ میکرومتر..... ۵۸

شکل۴-۹. (الف)همزن مکانیکی، (ب)همزن مغناطیسی و (پ)همزن اولتراسونیک..... ۶۲

شکل۴-۱۰. نمودار مربوط به تغییرات ویسکوزیته در حین استفاده از همزن اولتراسونیک برای CUO یک و نیم درصد.... ۶۳

شکل۴-۱۱. نمودار مربوط به تغییرات ویسکوزیته در حین استفاده از همزن اولتراسونیک برای ZNO یک درصد ۶۳

شکل۴-۱۲. نمودار مربوط به تغییرات ویسکوزیته در حین استفاده از همزن اولتراسونیک برای ترکیب ZNO یک درصد و CUO نیم درصد.....۶۴

شکل۴-۱۳. نمایی از دوازده نانوروانکار تهیه شده در پروژه‌ی حاضر ۶۵

شکل۴-۱۴. سه ویژگی مربوط به دوره گذار سای[۱۱] ۶۶

شکل۴-۱۵. هشت نمونه از نمودارهای ضریب اصطکاک-زمان برای رفتار اولیه‌ی سایشی[۱۱].....۶۷

شکل۴-۱۶. نمودار خروجی از دستگاه پین روی دیسک با مشخصات دوره‌ی گذار سایش ۶۸

شکل۴-۱۷. نمایی از پروفایل نمونه بعد از سایش برای محاسبه کاهش وزن بر اساس اندازه گیری حجم ساییده شده[۶۵]..۶۹

شکل۴-۱۸. ترازوی استفاده شده در آزمایش‌ها با دقت ۰.۰۰۰۱ گرم ۶۹

شکل۵-۱. نمایی از هندسه دو سطح منحنی شکل در تماس با یکدیگر[۶۶] ۷۲

شکل۵-۲. نمونه‌ای از سطح تماس پین بر روی دیسک در مختصات کارتزین[۶۶].....۷۳

شکل۵-۳. جدایش بین دو سطح زبر واقعی [۷۵].....۷۵

شکل۵-۴. ضخامت فیلم روان‌کار بین سطوح زبر [۷۵].....۷۶

شکل۵-۵- مساحت سطح تماس زبری‌ها [۷۱] ۸۱

شکل۶-۱. نمودار استرایبک با توجه به داده های تجربی بدست آمده در آزمایش‌ها ۹۰

شکل۶-۲. نمودار سرعت بر حسب مسافت در زمان گذار سایش در حالت‌های مختلف ۹۲

شکل۶-۳. نمودار مسافت طی شده در زمان گذار سایش بر حسب کیفیت سطح در حالت‌های مختلف ۹۳

شکل۶-۴. تاثیر سرعت برضریب اصطکاک در پایان دوره‌ی گذار سایش ۹۴

شکل۶-۵. تاثیر زبری اولیه‌ی سطح بر کاهش وزن نمونه سایشی در زمان گذار..... ۹۶

شکل۶-۶. نمودار کاهش وزن دوره‌ی گذار سایش بر حسب نیروی اعمالی ۹۶

شکل۶-۷. مدل شبکه عصبی مورد استفاده در این پروژه..... ۱۰۰

شکل۶-۸. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت در هر لحظه برای حالت روانکاری بدون افزودنی..... ۱۰۷

شکل۶-۹. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت در هر لحظه برای حالت روانکاری با ۱.۵٪ وزنی ZNO..... ۱۰۸

شکل۶-۱۰. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت در هر لحظه برای حالت روانکاری با ۱٪ وزنی ZNO..... ۱۰۸

شکل۶-۱۱. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت در هر لحظه برای حالت روانکاری با ۱.۵٪ وزنی CNO و ۰.۵٪ ZNO ۱۰۹

شکل۶-۱۲. درصد نسبی کاهش μ_0 با نانو روانکارها نسبت به حالت روانکاری بدون افزودنی ۱۱۰

شکل۶-۱۳. درصد نسبی کاهش μ_S با نانو روانکارها نسبت به حالت روانکاری بدون افزودنی ۱۱۱

شکل۶-۱۴. درصد ازدیاد مسافت طی شده در زمان گذار سایش با نانو روانکارها نسبت به حالت روانکاری بدون افزودنی۱۱۲

شکل۶-۱۵. درصد نسبی کاهش وزن نمونه با نانو روانکارها به حالت روانکاری بدون افزودنی ۱۱۳

شکل۶-۱۶. مقایسه بین نتایج تجربی و تئوری ۱۱۵

شکل۶-۱۷. سهم زبری‌ها و روانکار در ضریب اصطکاک کل مربوط به $P=40N$, $R_Q=0.9\mu m$ ۱۱۵

چکیده

در طول زمان گذار سایش ضریب اصطکاک و کیفیت سطح قطعات در حال سایش پیوسته در حال تغییرند تا اینکه به حالت پایا برسند. بنابراین شرایط کارکرد قطعات در زمان گذار سایش نقش مهمی را در عملکرد قطعات در حال سایش از جمله چرخدنده‌ها، برینگ‌ها، پیرو و بادامک وغیره در زمان پایا ایفا می‌کند. پروژه‌ی حاضر دارای دو فاز مجزا می‌باشد. در فاز اول یک سری آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه پین بر روی دیسک بر روی نمونه‌ای از جنس st37 در حضور روانکار انجام گرفته است. پارامترهای ورودی این آزمایش‌ها عبارتند از سرعت، نیرو و کیفیت سطح اولیه که تاثیر آنها بر روی پارامترهای گذار سایش از جمله مسافت طی شده در زمان گذار، کاهش وزن نمونه، ضریب اصطکاک و غیره بررسی شده است. سپس نتاج با استفاده از روش حداقل مربعات و همچنین شبکه‌ی عصبی مدل سازی شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دو برابری نیروی اعمالی و ثابت بودن دیگر پارامترهای ورودی، مسافت طی شده در زمان گذار در حدود ۱۳ ٪ کاهش می‌یابد. همچنین با دو برابر کردن سرعت تماس و ثابت بودن نیرو و کیفیت سطح اولیه، مسافت طی شده در زمان گذار در حدود ۱۹٪ کاهش می‌یابد. در ادامه‌ی این فاز با استفاده از نرم‌افزار متلب دستگاه مورد استفاده شده مدل‌سازی گردید و نتایج آن با آزمایش‌های تجربی مقایسه گشت که از دقت قابل قبولی برخوردار بود. در فاز دوم با استفاده از نانوذرات CuO و ZnO و ایجاد نانو روانکار با این دو نانوذره و همچنین ترکیبی از آنها سعی بر کاهش میزان سایش در زمان گذار گردید. نتایج نشان می‌دهد که برای نانوروانکاری با درصد وزنی ۱ ٪ اکسید روی و ۰.۵٪ اکسید مس، بیش از ۲۳ ٪ کاهش در ضریب اصطکاک نهایی و همچنین بیش از ۶۰ ٪ بهبود در کاهش وزن نمونه آزمایش دیده می‌شود.

کلمات کلیدی: سایش،زمان گذار سایش، پین بر روی دیسک، روش حداقل مربعات، مدل‌سازی، نانو روانکار

فصل اول
مقدمه

۱-۱. پیش‌گفتار

ترایبولوژی[1] شاخه‌ای از علم است که سطوح در تماس با یکدیگر را از لحاظ خواص اصطکاکی و سایشی بررسی می‌کند. سایش و اصطکاک دوپدیده‌ای هستند که به طور همزمان در اثر لغزش و تماس سطوح دو جسم به وقوع می‌پیوندد. با توجه به این که علت اصلی تخریب سطحی قطعات خوردگی، خستگی و سایش می‌باشد بررسی رفتار سایشی قطعات از اهمیت ویژه ای برخوردار است. پروسه سایش به دو مرحله گذار[2] و پایا[3] تقسیم‌بندی می‌شود. در این تحقیق سعی بر این شده است که قسمت گذار سایش به صورت عملی و تئوری مورد مطالعه قرار گیرد.

تغییرات در اصطکاک، دما و نرخ سایش معمولا مدت کوتاهی پس از شروع تماس لغزشی بین دو سطح مشاهده می‌شود تا اینکه به حالت پایا برسد. این نوسانات موقت هستند و گاهی اوقات نادیده گرفته می‌شوند و یا به سادگی آن را به عنوان دوره طبیعی سایش می‌پذیرند، اما در سال‌های اخیر تحقیقات نشان داده است برای بهبود عملکرد قطعاتی از قبیل یاتاقان‌ها، چرخدنده‌ها و ... در حالت پایا می‌بایستی به بررسی پدیده سایش در حالت گذار پرداخت. آنچه در این فصل

---

[1] . Tribology
[2] . Running-in
[3] . Steady state

می‌آید تعریفی از سایش، انواع آن، کارهای صورت گرفته در این ارتباط، توضیح دستگاه‌های آزمایش‌ها می‌باشد.

۱-۲. سایش و ساز و کارهای آن

بنا به تعریف، سایش عبارت است از، کاهش تدریجی ماده از سطح جسمی که در تماس با جسم دیگر بوده که این دو جسم نسبت به یکدیگر دارای حرکت هستند. پدیده سایش بر خلاف خواصی نظیر سختی و الاستیسیته خاصیت ذاتی ماده به شمار نمی‌رود، بلکه به مؤلفه‌های تریبوسیستم بستگی دارد. تریبوسیستم یک سیستم مهندسی است که بر رفتار سایشی و اصطکاکی مواد در تماس با یکدیگر تأثیر می‌گذارد. زمان، سرعت، دما، نیرو، کیفیت سطح، جنس روانکار، جنس ماده، شرایط سطحی، سایش، اصطکاک و ارتعاش، مولفه‌های یک تریبوسیستم هستند که بر رفتار سایشی و اصطکاک مواد تأثیر می‌گذارند. علاوه بر مؤلفه‌های یک تریبوسیستم عواملی از جمله ساختمان کریستالی ، اندازه دانه‌های حضور یافته می‌تواند بر رفتار سایشی و اصطکاکی تأثیر بگذارد.

۱-۲-۱. انواع سایش

به طور کلی سایش را می توان به دو صورت زیر بیان کرد:

۱. جابجا شدن یک ماده ممکن است به نحوی انجام شود که، فقط تغییراتی در شکل یا خواص آن ایجاد شود و اتلاف ماده در آن یا اصلاً رخ نمی‌دهد، یا بسیار ناچیز است.
۲. تغییر جرم یا حجم در یک یا هر دو سطح در تماس با یکدیگر ایجاد شده، و منجر به جداشدن ذرات سایشی می‌گردد. در این حالت نرخ سایشی (به صورت عمق ماده جابجا شده) به ازای واحد حجم یا جرم ماده جابجا شده در واحد مسافت طی شده بیان می شود[۱].

سایش انواع مختلفی دارد که در زیر به سه حالت عمده‌ی آن اشاره شده است:

۱) سایش خراشان[1]: این نوع سایش زمانی اتفاق می‌افتد که یک جسم جامد در معرض ماده‌ای قرار گرفته که دارای سختی معادل یا بزرگتر است. در هر ماده‌ای حتی اگر سطح خیلی نرم باشد، ممکن است این نوع سایش اتفاق بیفتد. اگر ذرات سخت حضور داشته باشند اولین مکانیسم سایش، برش است که، برجستگی‌های تیز سطوح نرم را می برند و موادی که بریده می‌شوند به عنوان براده‌های سایش جدا می‌شوند. وقتی که یک ماده نرم به وسیله برجستگی‌های لبه ضخیم ساییده شود احتمال برش کم است و سطوح ساییده شده به طور مرتب

[1] . Abrasive wear

شکل می‌گیرند و ترمیم می‌شوند. در این حالت براده‌های سایش نتیجه خستگی فلز است. برای این نوع سایش دونوع مکانیسم وجود دارد. برش و ترمیم شکاف‌ها با پوسته‌های شبیه براده که مکانیسم دوم دارای اثر کمتری روی حذف فلز نسبت به برش است. اما در شرایط سایش واقعی اثر برش به تنهایی کم است و حذف مواد و تشکیل براده با هر دو مکانیسم برش و خستگی است[۲]. حضور یک روانکار هم یک فاکتور مهم است زیرا می‌تواند باعث برش با ذرات ساینده شود. ولی در حضور روانکار نسبت برش کمتر است. این اشاره می‌کند که اگر برجستگی در جای خود محکم باشد و در یک فلز نرم قرار گرفته باشد و تحت باری بر روی یک فلز سخت کشیده شود، یک میکرو برش سریع نسبت به زمانی که روانکار نیست، اتفاق می افتد. شکل ساینده‌ها هم مهم است. مثلا یک برجستگی سوزنی با تعدادی لبه‌های میکرو برش شده، براده‌های بیشتری نسبت به هرمی یا کروی ایجاد می‌کند.همچنین یک برجستگی ساییده نشده دارای لبه‌های میکروبرش بیشتری نسبت به یک برجستگی با لبه‌های ساییده شده و گرد است[۳].

۲) سایش چسبان۱ : این نوع سایش به وسیله تماس ذرات جامد یا مایع اتفاق می‌افتد. زمانی که ذرات سخت باشند فرآیندی مشابه سایش خراشان اتفاق می‌افتد. جایی که ذرات مایع ساینده باشند، فرآیند سایش دیگر مثل قبل نیست. و نتیجه استرس‌های مداوم روی سطح است. این نوع سایش به این دلیل به این نام است که مکانیسم آن زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات نسبتاً کوچک در تماس با اجزا مکانیکی قرار می‌گیرند. مکانیسم-های ممکن برای این نوع سایش عبارتند از:۱-خراش در زاویه تماس کم ۲-خستگی سطح در سرعت کم و زاویه تماس بالا ۳- شکاف‌های ترک خورده یا تغییر شکل پلاستیکی در سرعت متوسط ۴-سایش ماکروسکوپی با اثر ثانویه ۵ -تجزیه شبکه کریستالی از تماس با اتم[۴].

۳) سایش خستگی سطحی۲:در این پروسه سطح ماده توسط بارگذاری متناوب تضعیف می شود که یک نوع مرسوم از خستگی است. سایش خستگی زمانی ایجاد می شود که ذرات سایش توسط رشد متناوب میکرو ترک روی سطح جدا شده اند.این میکرو ترک‌ها می توانند هم زیر سطح باشتد و هم روی سطح و این سایش را می توان با تشکیل ترک و جدا شدن ماده از سطح به علت اعمال نیروهای متناوب تکراری ایجاد کرد .

---

[1] . Adhesive wear
[2] . Surface fatigue wear