

بررسی تجربی صحت قانون ماینر در سایش چسبان در تماس سطوح پوشش دار تحت بارگذاری های صعودی، نزولی و تصادفی

محمد حسین فروغی کیا، صالح اکبرزاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۲۸ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲)

چکیده

پوشش دهی یکی از فرایندهایی است که برای بهبود خواص تریبولوژیکی سطوح استفاده می‌شود. در این مقاله میزان افزایش طول عمر مفید قطعه با پوشش نرم مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین صحت قانون ماینر در پیش‌بینی سایش چسبان برای نمونه‌هایی که تحت بارگذاری ترکیبی قرار می‌گیرند، مطالعه شده است. برای این منظور مجموعه‌ای از آزمایش‌های پین روی دیسک بر روی سه مجموعه دیسک با بارگذاری تک نیرویی، دو نیرویی متوالی، و سه نیرویی متوالی تحت دو سرعت ثابت برای دیسک‌های ساده و دیسک‌های با پوشش دولایه و دیسک‌های با پوشش چهارلایه صورت گرفته است. نتایج تجربی نشان می‌دهد استفاده از قانون ماینر برای پیش‌بینی خرابی قطعه تحت بارگذاری‌های متوالی با سرعت ثابت صحیح است. از سوی دیگر کار انجام شده توسط نیروی اصطکاک نیز محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای هر کدام از قطعات با پوشش مشخص، صرف نظر از توالی بارگذاری میزان کار انجام شده توسط نیروی اصطکاک تا لحظه خرابی عددی یکسان است. به عبارت دیگر در بارهای صعودی و نزولی و تصادفی، فارغ از ترتیب بارگذاری خرابی قطعه زمانی رخ می‌دهد که کار نیروی اصطکاک به یک عدد ثابت برسد.

واژگان کلیدی: قانون ماینر، عمر مفید، انرژی تلف شده، پوشش نرم، تست پین روی دیسک.

An experimental Investigation of the validity of Miner's Law for adhesive wear of coated surfaces under different loading conditions (increasing, decreasing, and random loading)

Mohammad Hossein Foroughikia, Saleh Akbarzadeh

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156-83111, Iran

(Received 18 March 2020, accepted 24 August 2021)

Abstract

Coating is one of the processes used to improve the tribological properties of surfaces. In this article, the increase in useful lifetime of soft-coated part and the validity of Miner's rule for predicting adhesive wear are investigated. In order to achieve this aim, a series of pin-on-disk experiments on three sets of disks were performed by single-force, two consecutive-forces and three-forces loading conditions, at two constant speed levels. These experiments were performed for simple, double-layer and four-layer coated disks. As a result, the validity of Miner's rule for consecutive loads at a constant speed is shown. Also, the work done by friction force and wasted energy are investigated. It is shown that for each of the parts with a specified coating, regardless of loading sequence, the work done by friction force up to the failure point is almost a constant value.

Key words: Miner's rule, Useful lifetime, Wasted energy, Soft-coating, Pin-on-disk Test.

E-mail of Corresponding author: s.akbarzadeh@iut.ac.ir.

مقدمه

عمر کاری قطعات مکانیکی که تحت تماس هستند از سه ناحیه کلی دوره گذار، دوره پایا و دوره خرابی تشکیل شده است. پیش‌بینی عمر مفید برای قطعاتی که تحت بارگذاری‌های مختلف و یا تحت سایش قرار دارند از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو، تاکنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی این پارامتر ارائه شده است. مهندسی سطح به معنی انجام عملیات‌هایی روی سطح است که برای بهبود خصوصیات سطحی مواد و ایجاد پوشش‌های سخت و نرم انجام می‌گیرد [۱]. پوشش‌دهی بر روی زمینه‌های مختلف امروزه بطور گسترده‌ای در صنایع اتومبیل‌سازی، پتروشیمی و هوافضا کاربرد پیدا کرده است [۲]. از سوی دیگر یکی از اقدامات برای بهبود خواص تریبولوژیکی سطوح، استفاده از پوشش است. هدف از این پژوهش، صحت‌سنجی تجربی استفاده از قانون ماینر برای پیش‌بینی خرابی قطعات به علت بروز سایش است.

در سال ۱۹۵۴ میلادی ماینر قانونی را که اولین بار توسط پالمگرن در سال ۱۹۲۴ میلادی پیشنهاد شده بود را رایج کرد. پالمگرن اولین کسی بود که آسیب خستگی متوالی ناشی از نیروهای متغیر را در نظر گرفت [۳]. این قانون، که قانون ماینر یا فرضیه‌ی آسیب پالمگرن-ماینر است بیان می‌کند عمر خستگی قطعه را می‌توان از جمع درصد عمر مصرف شده توسط هر سیکل خستگی تحت هر نیرو بدست آورد [۴]. این فرضیه بیان می‌کند که شکست قطعه زمانی رخ می‌دهد که مجموع این آسیب‌ها به مقدار ثابت $C=1$ برسد البته مقدار C بین عدد $0/7$ تا $2/2$ تغییر می‌کند. البته لازم به ذکر است که قانون ماینر به ترتیب اعمال نیروها اهمیت نمی‌دهد [۵]. تلاش برای پیش‌بینی رفتار سایش در سال ۱۹۵۰ میلادی آغاز شد [۶] و پس از بیان قانون ماینر رابطه بین سایش و خستگی توسط کراگسلیکی توصیف شد [۷]. بسیاری از اجزاء مکانیکی

وجود دارند که تحت بارهای متغیر و سرعت‌های متفاوت قرار می‌گیرند و به علت نحوه تغییر نیروی اعمالی یا سرعت کاری، عمر مفید آن‌ها دچار تغییر می‌شود [۸]. این مسئله بطور تجربی توسط میلر در سال ۱۹۷۰ میلادی مطرح شد و نشان داد هنگامی که بارگذاری بصورت صعودی باشد و بار از بار کم به بار زیاد اعمال شود مقدار عدد C اغلب بیشتر از زمانی است که بارگذاری بالعکس (از بالا به پایین) اعمال می‌شود [۹].

در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری برای بررسی صحت قانون ماینر برای انواع مکانیزم‌های سایش تحت بارگذاری‌های مختلف صورت گرفته است. تحلیل‌های جدید مدل‌های سایش براساس تعادل انرژی [۱۰]، تعادل جرم [۱۱]، تحلیل تنش-کرنش [۱۲]، توصیف آنتروپیک می‌باشد [۱۳-۱۶]. اکرزاده و خوانساری [۱۷] نشان داده‌اند که قانون ماینر برای پیش‌بینی سایش چسبان در نمونه‌های بدون پوشش صدق می‌کند. آنها نشان دادند که ترتیب بارگذاری بر ثابت C قانون ماینر اثر می‌گذارد. در بارگذاری‌هایی که بار از کم به بار زیاد انجام شده ثابت C کمی بیشتر از یک و برای بارگذاری‌های بالعکس کمی کمتر از یک می‌باشد. همچنین در بارگذاری متوالی از بار زیاد به بار کم قطعات قبل از شروع پیش‌بینی شکست می‌خورند. فریدونی و همکاران [۱۸] با استفاده از تست پین روی دیسک بررسی صحت قانون ماینر را برای پیش‌بینی سایش چسبان با توالی بارگذاری‌های متوالی مختلف بروی نمونه‌های فولادی انجام دادند که همان نتایج مقاله اکبرزاده و خوانساری بدست آمده است. در تلاشی دیگر لیجیش و خوانساری [۱۹] برای یک دیسک با پوشش نرم (رنگ مشکی بروی قطعه ی برنجی) آزمایش‌های مختلفی با بار ثابت و سرعت متغیر انجام دادند و نشان دادند که میزان آنتروپی تولید شده در لحظه شکست در این حالت به یک مقدار مشخص می‌رسد.

اقدامات تجربی

در این بخش آزمایش پین روی دیسک و طراحی آزمایش‌های انجام شده تشریح می‌شود.

آزمایش سایش پین روی دیسک

در این تحقیق از آزمون سایش پین روی دیسک مدل WT50 با ظرفیت نیرویی ۳۰۰ نیوتون استفاده شده است. در شکل ۱ تصویر دستگاه مورد استفاده و در شکل نحوه تماس بین پین و دیسک در قطعه پوشش‌دار آمده است. به کمک حسگر نیرو می‌توان نیروی اصطکاک را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۱. تصویر دستگاه تست سایش پین روی دیسک.



شکل ۲. تصویر تماس پین و دیسک.

آماده‌سازی قطعه

آزمایش‌های انجام شده در این مقاله همگی از نوع آزمایش سایش پین روی دیسک بوده است. بدین منظور از سه نوع دیسک استفاده شده که این دیسک‌ها از جنس

در این مقاله تاثیر پوشش نرم بر عمر مفید قطعه نشان داده می‌شود. برای این کار نمونه‌هایی از فولاد بدون پوشش، با پوشش دولایه و با پوشش چهار لایه تهیه شده است و صحت قانون ماینر برای پیش‌بینی عمر قطعات فولادی با پوشش نرم بصورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار آزمایش پین روی دیسک با ترکیب بارگذاری‌های مختلف با سرعت‌های متفاوت انجام شده است. پس از بررسی قانون ماینر به بررسی انرژی تلف شده تحت بارگذاری‌ها با بار مختلف، سرعت‌های متفاوت و بارگذاری‌های ترکیبی پرداخته می‌شود.

تئوری

قانون ماینر برای پیش‌بینی عمر خستگی در قطعات تحت بارهای متوالی استفاده می‌شود. عمر کل خستگی قطعات را می‌توان از جمع درصد عمر مصرف شده توسط هر سیکل خستگی بدست آورد. اگر n_1, n_2, \dots, n_k بیانگر تعداد سیکل‌های اعمالی و N_1, N_2, \dots, N_k عمر خستگی آن قطعه تحت نیروهای F_1 و F_2 و ... باشد براساس قانون ماینر:

$$C = \sum_{i=1}^K \left(\frac{n_i}{N_i} \right)_{F_i} \quad (1)$$

مقدار C به صورت تجربی بین ۰/۷ تا ۲/۲ است ولی برای طراحی مهندسی این مقدار ۱ در نظر گرفته می‌شود [2]. اگرچه قانون ماینر در ابتدا برای پیش‌بینی عمر خستگی ارائه شده بود اما پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که می‌شود از این رابطه برای پیش‌بینی عمر سایشی قطعات نیز استفاده کرد [۴-۶]. یکی از روش‌های متداول برای انجام آزمون سایش استفاده از دستگاه تست سایش پین روی دیسک است. از منظر انرژی، انرژی از دست رفته همان کار انجام شده توسط نیروی اصطکاک در تماس قطعات می‌باشد. کار انجام شده در آزمایش پین روی دیسک از محاسبه مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی آزمایش بدست می‌آید.

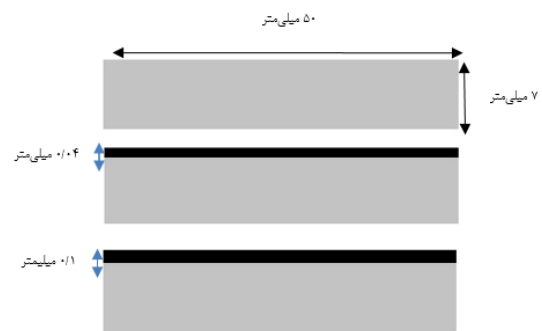
نیوتون، ۴۰ نیوتون تحت سرعت ۰/۱۶ متر بر ثانیه انجام شد.

سپس تست‌هایی تحت نیروهای ترکیبی انجام گرفت که در آن نیروها بصورت صعودی، نزولی و تصادفی اعمال می‌شوند و میزان عمر قطعه و همچنین ثابت C در قانون ماینر محاسبه شده است. به علاوه کار انجام شده توسط نیروی اصطکاک نیز محاسبه شده است.

نتایج

در شکل بصورت نمونه نتایج تست سایش برای سه دیسک (بدون پوشش، پوشش دولایه با ضخامت ۰/۰۴ میلی‌متر، و پوشش چهارلایه با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر) تحت نیروی ۲۰ نیوتون و سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه آورده شده است. از نتایج نمودار مشاهده شده که با افزودن پوشش، عمر قطعه افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت پوشش از پوشش دولایه به پوشش چهارلایه باعث طولانی شدن عمر نمونه شده است. در این حالت زمان بیشتری برای سایش پوشش لازم است و در نتیجه عمر قطعه افزایش می‌یابد. این تست برای نیروهای مختلف انجام شده است و نتایج آن در جدول آمده است. نتایج بدست آمده در جدول نشان می‌دهد این پوشش برای ضخامت ۰/۰۴ میلی‌متر رنگ توانسته حدود ۵۰۰-۶۰۰٪ عمر مفید را افزایش داده است و برای ضخامت ۰/۱ میلی‌متر توانسته حدود ۷۰۰-۸۰۰٪ بر عمر مفید بیافزاید. اثر نیرو و نوع پوشش بر عمر مفید قطعه در شکل آمده است.

فولاد st37 با قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۷ میلی‌متر، دارای سطح صاف که توسط سنگ زنی مغناطیسی پرداخت شده‌اند می‌باشند. این دیسک‌ها در سه مجموعه‌ی بدون پوشش با سختی سطح HB ۱۴۳، با پوشش نرم از نوع رنگ آکرلیک پلی اورتان به ضخامت ۰/۰۴ میلی‌متر با سختی سطح HB ۱۱۵، و پوشش نرم از همان مدل رنگ با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر با سختی سطح HB ۱۳۱ قرار دارند (شکل). برای پین نیز از فولاد سخت شده ۵۲۱۰۰ به طول ۲۵ میلی‌متر و قطر ۵ میلی‌متر با نوک نیمه کروی استفاده شده است. برای هر آزمایش از یک پین جدید برای اندازه گیری دقیق سایش انجام شده است.



شکل ۳. دیسک ساده، دیسک با پوشش دولایه و دیسک با پوشش چهارلایه.

در ابتدا تست‌هایی برای بررسی عمر قطعات تحت نیروی ثابت انجام شد. منظور از عمر قطعه این است که تست تا زمانی ادامه خواهد داشت که مقدار ضریب اصطکاک نوسانات زیادی را تجربه کند. در واقع در این حالت دیسک از مرحله گذار و همچنین پایا عبور کرده است و وارد مرحله خرابی می‌شود. این تست‌ها برای دیسک‌های ساده، دیسک‌های با پوشش دولایه و همچنین دیسک‌های با پوشش چهارلایه انجام شد. تمام تست‌ها تحت نیروهای ۵ نیوتون، ۱۰ نیوتون، ۲۰ نیوتون، ۳۰ نیوتون، ۴۰ نیوتون در سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه و نیروهای ۲۰ نیوتون، ۳۰

پس از تعیین عمر مفید برای هر نیروی اعمالی، آزمون‌های تجربی برای بارگذاری ترکیبی انجام شد. برای این کار فرض شد عدد ثابت در قانون ماینر، $C = 1$ باشد و عمر مفید برای بارگذاری‌های متوالی بر این اساس پیش‌بینی شد. نحوه استفاده از این قانون برای حالت سه نیرویی به شکل زیر می‌باشد.

$$C = \left(\frac{n_1}{N_1}\right)^{L_1} + \left(\frac{n_2}{N_2}\right)^{L_2} + \left(\frac{n_3}{N_3}\right)^{L_3} \quad (2)$$

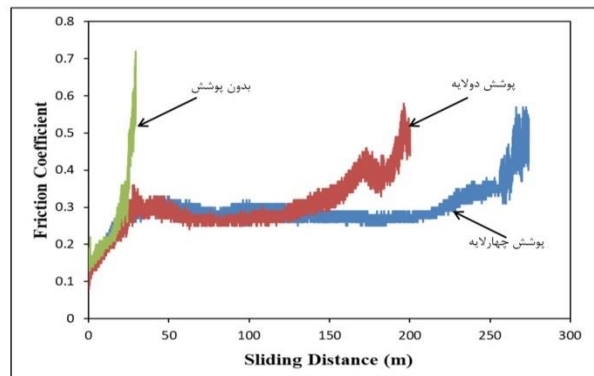
که در این معادله L_i نیروی اعمالی در بخش i می‌باشد و N_i عمر مفید در حالت نیروی i می‌باشد که از جدول ۱ قابل مشاهده است و n_i عمر گذارنده شده در بارگذاری متوالی می‌باشد.

نتایج بررسی صحت این قانون بصورت تجربی در شکل ۵. اثر نیرو و نوع پوشش بر عمر مفید قطعه.

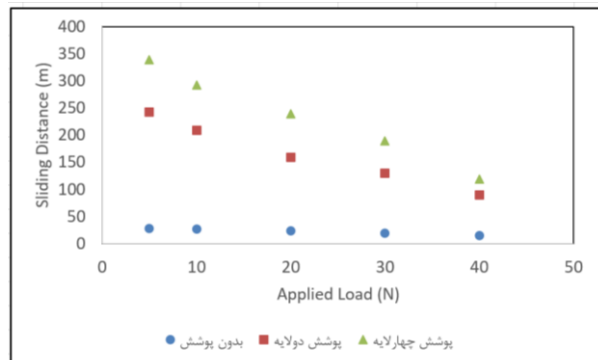
جدول قابل مشاهده است. برای بارگذاری متوالی با نیروهای به ترتیب ۲۰-۳۰-۴۰ نیوتون و سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه مقدار C بدست آمده به عدد یک نزدیک می‌باشد. شکل ترتیب بارگذاری و عمر مفید برای دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی‌متر در سرعت ثابت ۰/۰۸ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. عمر مفید مجموعه دیسک‌ها در سرعت ثابت ۰/۰۸ متر بر ثانیه

نیرو (نیوتون)	دیسک بدون پوشش	دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی‌متر	دیسک با پوشش ۰/۱ میلی‌متر
۵	۲۸ متر	۲۴۳ متر	۳۴۰ متر
۱۰	۲۶ متر	۲۰۹ متر	۲۹۲ متر
۲۰	۲۴ متر	۱۶۰ متر	۲۴۰ متر
۳۰	۲۰ متر	۱۳۰ متر	۱۹۰ متر
۴۰	۱۶ متر	۹۰ متر	۱۲۰ متر



شکل ۴. نمودار ضریب اصطکاک سبانه‌جایی سه مجموعه دیسک با نیروی ۲۰ نیوتون و سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه.

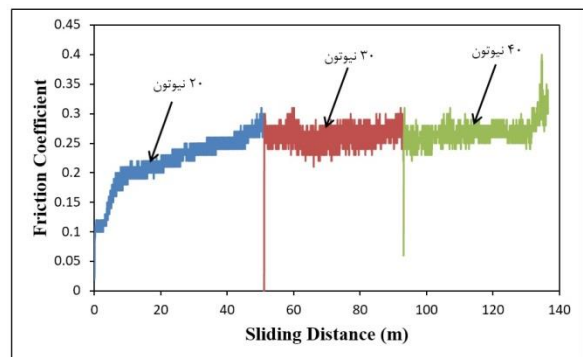


شکل ۵. اثر نیرو و نوع پوشش بر عمر مفید قطعه.

جدول ۲. نتایج تجربی بدست آمده مقادیر C برای بارگذاری متوالی ۲۰-۳۰-۴۰ نیوتون با سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه

C	آزمایش انجام شده
$\left(\frac{8}{24}\right)_{20} + \left(\frac{6.66}{20}\right)_{30} + \left(\frac{5.24}{16}\right)_{40} = 0.995$	دیسک بدون پوشش
$\left(\frac{53.33}{160}\right)_{20} + \left(\frac{43.33}{130}\right)_{30} + \left(\frac{32.2}{90}\right)_{40} = 1.017$	دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی متر
$\left(\frac{80}{240}\right)_{20} + \left(\frac{63.33}{190}\right)_{30} + \left(\frac{41.1}{120}\right)_{40} = 1.006$	دیسک با پوشش ۰/۱ میلی متر

است، که در جدول قابل مشاهده می باشد. مقادیر کار نیروی اصطکاک در بارهای ۲۰ نیوتون، ۳۰ نیوتون، ۴۰ نیوتون در هر مجموعه دیسک بصورت مجزا در حالت تک نیرویی با سرعت ثابت ۰/۰۸ متر بر ثانیه بسیار به هم نزدیک می باشد. به عبارتی، دیسک زمانی دچار خرابی می شود و عمر آن تمام می شود که کار نیروی اصطکاک به یک مقدار مشخص برسد. مشاهده شد که کار انجام شده توسط نیروی اصطکاک تا لحظه خرابی، برای نمونه های با پوشش بیشتر از نمونه های بدون پوشش است. همچنین با افزایش ضخامت پوشش، کار نیروی اصطکاک نیز افزایش می یابد.



شکل ۶. نمودار ضریب اصطکاک - جابه جایی با بارگذاری

متوالی ۲۰-۳۰-۴۰ نیوتون با پوشش ۰/۰۴ میلی متر با سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه.

سپس کار انجام شده توسط نیروی اصطکاک یا همان انرژی تلف شده محاسبه شد. این پارامتر از محاسبه مساحت زیر نمودار نیرو-مسافت طی شده بدست آمده

جدول ۳. انرژی تلف شده در آزمایش های تک نیرویی با سرعت ثابت ۰/۰۸ متر بر ثانیه

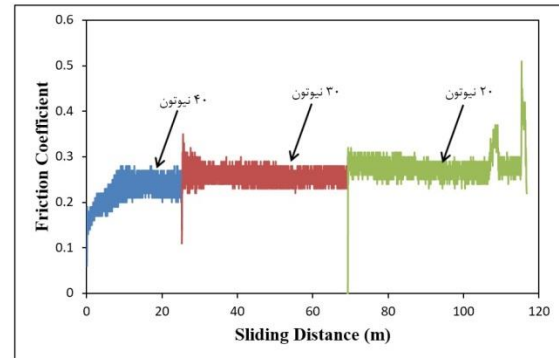
نیرو (نیوتون)	دیسک بدون پوشش	دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی متر	دیسک با پوشش ۰/۱ میلی متر
۲۰	۷/۹۰ ژول	۶۸/۵۱ ژول	۱۱۶/۸۱ ژول
۳۰	۸/۹۳ ژول	۶۶/۶۶ ژول	۱۱۹/۲۹ ژول
۴۰	۹/۹۰ ژول	۶۸/۸۶ ژول	۱۱۵/۷۴ ژول

Error! Reference not found. و مقایسه آن با

source not found. قابل مشاهده است. این موضوع برای هر سه مجموعه دیسک در جدول نشان داده شده است.

پس از اینکه مشاهده شد ترتیب قرار گرفتن نیروها بر عمر مفید در بارگذاری های متوالی تاثیر می گذارد. بررسی صحت قانون ماینر برای این بارگذاری ها بررسی شد و مقدار C اندازه گیری شد. برای این کار تست های چند نیرویی بصورت صعودی و نزولی بر روی نمونه های بدون پوشش و با پوشش دولایه و چهارلایه انجام شد و اجازه داده شد که تست تا زمانی که قطعه دچار خرابی می شود ادامه داشته باشد. مشاهده شد مقادیر C در این حالت ها از یک کمتر می باشند. این مقادیر در Error! Reference source not found. و جدول قابل مشاهده است.

اثر ترتیب اعمال نیروها



شکل ۷. نمودار ضریب اصطکاک-مسافت طی شده ی با بارگذاری متوالی ۲۰-۳۰-۴۰ نیوتون با پوشش ۰/۰۴ میلی متر با سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه.

با تغییر ترتیب اعمال نیروها در تست های چندنیرویی و قرار دادن نیروهای بیشتر در ابتدای آزمایش و انجام آزمایش با بارگذاری متوالی با ترتیب نیروی ۳۰-۴۰-۲۰ نیوتون و ۲۰-۳۰-۴۰ نیوتون مشاهده شد، که هرچه نیروی بیشتری در ابتدا وارد شود عمر مفید به نسبت بارگذاری نیرو از صعودی (از کمتر به بیشتر) کاهش می یابد. این امر در Error! Reference source

جدول ۴. عمر مفید مجموعه دیسک ها در بارگذاری های متوالی مختلف با سرعت ثابت ۰/۰۸ متر بر ثانیه

نیرو (نیوتون)	عمر مفید برای دیسک بدون پوشش (متر)	عمر مفید برای دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی متر (متر)	عمر مفید برای دیسک با پوشش ۰/۱ میلی متر (متر)
۲۰-۳۰-۴۰	۱۹/۸	۱۲۸/۸	۱۸۴/۴
۲۰-۴۰-۳۰	۱۸/۷	۱۲۴/۵	۱۷۷/۸
۴۰-۳۰-۲۰	۱۸/۵	۱۲۲/۳۲	۱۷۵

جدول ۵. نتایج تجربی بدست آمده مقادیر C برای بارگذاری متوالی ۲۰-۴۰-۳۰ نیوتون با سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه

C	آزمایش انجام شده
$\left(\frac{8}{24}\right)_{20} + \left(\frac{5.33}{16}\right)_{40} + \left(\frac{6.47}{20}\right)_{30} = 0.948$	دیسک بدون پوشش
$\left(\frac{53.33}{160}\right)_{20} + \left(\frac{30}{90}\right)_{40} + \left(\frac{41.17}{130}\right)_{30} = 0.983$	دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی متر

$$\left(\frac{80}{240}\right)_{20} + \left(\frac{40}{120}\right)_{40} + \left(\frac{57.8}{190}\right)_{30} = 0.971$$

دیسک با پوشش ۰/۱ میلی‌متر

جدول ۶. نتایج تجربی بدست آمده مقادیر C برای بارگذاری متوالی ۲۰-۴۰-۳۰ نیوتون با سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه

C	آزمایش انجام شده
$\left(\frac{5.33}{16}\right)_{40} + \left(\frac{6.66}{20}\right)_{30} + \left(\frac{6.5}{24}\right)_{20} = 0.930$	دیسک بدون پوشش
$\left(\frac{30}{90}\right)_{40} + \left(\frac{43.33}{130}\right)_{30} + \left(\frac{48.89}{160}\right)_{20} = 0.965$	دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی‌متر

$$\left(\frac{40}{120}\right)_{40} + \left(\frac{63.33}{190}\right)_{30} + \left(\frac{71.75}{240}\right)_{20} = 0.955$$

دیسک با پوشش ۰/۱ میلی‌متر

که همان نتایج را به دنبال داشت. این نتایج در جدول آمده است. مشاهده شد که ترتیب بارگذاری اثر چندانی بر انرژی تلف شده در یک سرعت ثابت برای این سه نیرو ندارد. بنابراین می‌توان گفت فارغ از ترتیب نیروها، زمانی که کار نیروی اصطکاک به مقدار ثابتی برسد، قطعه دچار خرابی می‌شود.

با توجه به نزدیک هم بودن انرژی تلف شده سه نیروی ۲۰ نیوتون، ۳۰ نیوتون، ۴۰ نیوتون، با اندازه گیری انرژی تلف شده در بارگذاری متوالی با ترتیب نیروی ۲۰-۴۰-۳۰ نیوتون و ۳۰-۴۰-۲۰ نیوتون مشاهده شد که ترتیب بارگذاری در یک سرعت ثابت در مقدار انرژی تلف شده تأثیری نمی‌گذارد. برای اطمینان بیشتر دو آزمایش دیگر دو نیرویی با ترتیب نیروی ۲۰-۴۰ نیوتون انجام شد.

جدول ۷. نتایج تجربی بدست آمده مقادیر C برای بارگذاری متوالی ۲۰-۴۰-۳۰ نیوتون با سرعت ۰/۰۸ متر بر ثانیه

نیرو (نیوتون)	انرژی تلف شده برای دیسک بدون پوشش	انرژی تلف شده برای دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی‌متر	انرژی تلف شده برای دیسک با پوشش ۰/۱ میلی‌متر
۲۰-۳۰-۴۰	بدون پوشش ۹/۴۶ ژول	۰/۰۴ میلی‌متر ۶۶/۹۶ ژول	با پوشش ۰/۱ میلی‌متر ۱۱۷/۳۵ ژول
۲۰-۴۰-۳۰	۹/۱۵ ژول	۶۷/۲۸ ژول	۱۱۹/۵۴ ژول
۴۰-۳۰-۲۰	۸/۹۱ ژول	۶۷/۸۷ ژول	۱۱۸/۹۷ ژول
۴۰-۲۰	۹/۸۸ ژول	۶۹/۷۹ ژول	۱۱۹/۱۴ ژول
۲۰-۴۰	۹/۳۷ ژول	۶۷/۱۴ ژول	۱۱۸/۸۶ ژول

بارگذاری متوالی مشاهده شد تغییر سرعت تأثیری بر مقدار عدد C ندارد و اعداد بدست آمده در نتایج تجربی که در جدول آماده است به یک نزدیک است. بیشترین تأثیر سرعت در انرژی تلف مشاهده شد که انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. این تأثیر در جدول ۱ آمده است. همانطور که در نتایج بخش قبلی نیز مشاهده شد، در یک سرعت ثابت در بارهای ۲۰ نیوتون، ۳۰ نیوتون، ۴۰ نیوتون و در بارگذاری متوالی از ترکیب این بارها مقدار انرژی تلف شده تغییر چندانی نمی‌کند.

اثر افزایش سرعت با افزایش سرعت به ۰/۱۶ متر بر ثانیه و انجام آزمایش‌های تک نیرویی برای نیروهای ۲۰ نیوتون، ۳۰ نیوتون، ۴۰ نیوتون و آزمایش‌های بارگذاری متوالی به ترتیب نیرویی ۲۰-۳۰-۴۰ نیوتون و ۳۰-۴۰-۲۰ نیوتون و ۲۰-۳۰-۴۰ نیوتون مشاهده شد که عمر مفید با افزایش سرعت کاهش می‌یابد. نتایج جدول به ما نشان می‌دهد عمر مفید با دوبرابر شدن سرعت برای بارگذاری تک نیرویی حدود ۱۵-۲۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت در

جدول ۸. عمر مفید مجموعه دیسک‌ها در سرعت ثابت ۰/۱۶ متر بر ثانیه

نیرو	عمر مفید برای دیسک بدون پوشش (متر)	عمر مفید برای دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی‌متر (متر)	عمر مفید برای دیسک با پوشش ۰/۱ میلی‌متر (متر)
۲۰	۲۰ متر	۱۲۵ متر	۱۹۰ متر
۳۰	۱۶ متر	۱۰۵ متر	۱۴۷ متر
۴۰	۱۳ متر	۶۶ متر	۷۹ متر

جدول ۹. نتایج تجربی بدست آمده مقادیر C برای بارگذاری متوالی ۲۰-۳۰-۴۰ نیوتون با سرعت ۰/۱۶ متر بر ثانیه

C	آزمایش انجام شده
$\left(\frac{6.33}{20}\right)_{20} + \left(\frac{5.33}{16}\right)_{30} + \left(\frac{4}{13}\right)_{40} = 0.983$	دیسک بدون پوشش
$\left(\frac{42.66}{125}\right)_{20} + \left(\frac{34.66}{105}\right)_{30} + \left(\frac{22.7}{66}\right)_{40} = 1.007$	دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی‌متر
$\left(\frac{63.33}{190}\right)_{20} + \left(\frac{49}{147}\right)_{30} + \left(\frac{25}{79}\right)_{40} = 0.990$	دیسک با پوشش ۰/۱ میلی‌متر

جدول ۱۰. انرژی تلف شده در آزمایش‌های تک نیرویی و بارگذاری متوالی با سرعت ثابت ۰/۱۶ متر بر ثانیه

نیرو (نیوتون)	انرژی تلف شده برای دیسک بدون پوشش (ژول)	انرژی تلف شده برای دیسک با پوشش ۰/۰۴ میلی‌متر (ژول)	انرژی تلف شده برای دیسک با پوشش ۰/۱ میلی‌متر (ژول)
۲۰	۱۱/۸۳ ژول	۸۲/۸۴ ژول	۱۴۷/۸۰ ژول
۳۰	۱۲/۰۱ ژول	۸۷/۵۴ ژول	۱۴۲/۳۷ ژول
۴۰	۱۱/۵۴ ژول	۸۳/۵۱ ژول	۱۴۲/۵۶ ژول
۲۰-۳۰-۴۰	۱۱/۳۵ ژول	۸۴/۳۶ ژول	۱۴۷/۲۵ ژول

۲۰-۴۰-۳۰	ژول ۱۱/۹۸	ژول ۸۳/۱۰	ژول ۱۴۶/۹۰
۴۰-۳۰-۲۰	ژول ۱۱/۸۳	ژول ۸۱/۸۷	ژول ۱۴۵/۳۵

جمع بندی

در این مقاله از پوشش نرم رنگ آکرلیک پلی اورتان برای افزایش عمر مفید قطعات تحت سایش استفاده شد. مشاهده شد که این پوشش می‌تواند در ضخامت‌های مختلف بر عمر مفید قطعات تا مقادیر قابل توجهی بیافزاید. صحت استفاده از قانون ماینر برای پیش‌بینی سایش بررسی شد. با استفاده از قانون ماینر، عمر مفید مجموعه دیسک‌های تحت آزمایش با پوشش نرم تحت بارگذاری‌های متوالی با فرض مقدار $C = 1$ پیش‌بینی شد. انرژی تلف شده برای سه بار ۲۰ نیوتون، ۳۰ نیوتون، ۴۰ نیوتون برای هر سه مجموعه بصورت مجزا در یک سرعت ثابت تحت بارگذاری تک نیرویی، دو نیرویی متوالی، و سه نیرویی متوالی اندازه‌گیری شد که مشاهده شد برای هر مجموعه بطور مجزا مقادیر حدودا یکسان می‌باشد.

با بررسی اثر ترتیب بارگذاری در یک سرعت ثابت مشاهده شد ترتیب بارگذاری نزولی (از نیروی بیشتر به کمتر) عمر مفید را در بارگذاری متوالی کاهش می‌دهد و مقادیر C کمی از یک کمتر می‌شود. همچنین ترتیب بارگذاری بر انرژی تلف شده اثری ندارد و با تغییر در ترتیب بارگذاری مقادیر انرژی تلف شده تغییری نمی‌کند. در واقع در یک سرعت ثابت برای نیروهای ۲۰ نیوتون، ۳۰ نیوتون، ۴۰ نیوتون با هر نوع ترتیب بارگذاری تک نیرویی، دو نیرویی متوالی، و سه نیرویی متوالی در هر مجموعه دیسک مجزا انرژی تلف شده مقادیر یکسان می‌باشد. بعد از ترکیب بارگذاری به بررسی تغییر سرعت پرداخته شد که نتایج نشان داد افزایش سرعت عمر مفید را در حالت تک نیرویی کاهش می‌دهد. با بارگذاری متوالی در سرعت بیشتر و مقایسه مقادیر تجربی و تئوری

عدد C مشاهده شد که افزایش سرعت تغییری در مقدار C ندارد. بیشترین اثر تغییر سرعت در انرژی تلف شده است. با افزایش سرعت انرژی تلف شده به مقادیر قابل توجهی افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش یافته تحت سرعت ثابت برای نیروهای ۲۰ نیوتون، ۳۰ نیوتون، ۴۰ نیوتون با هر نوع ترتیب بارگذاری تک نیرویی، دو نیرویی متوالی، و سه نیرویی متوالی انرژی تلف شده در هر مجموعه دیسک مجزا مقادیر نزدیکی است. به عبارت دیگر، نشان می‌دهد که برای هر کدام از قطعات با پوشش مشخص، صرف نظر از توالی بارگذاری میزان کار انجام شده توسط نیروی اصطکاک تا لحظه خرابی عددی یکسان است. به عبارت دیگر در بارهای صعودی و نزولی و تصادفی، فارغ از ترتیب بارگذاری خرابی قطعه زمانی رخ می‌دهد که کار نیروی اصطکاک به یک عدد ثابت برسد.

۶- مراجع

1. N. Abe, J. Morimoto, M. Tomieh, C. Doi, *Formation of WC-Co Layer by an Electron Beam Cladding Method and Evolution of the Layer Properties*, Vacuum, 59 (2000) 373-380.
2. Z. Lio, L. Jian, W. Tao, *Preparation of WC-Co Composite Powder by Electroless Plating and Application in Laser Cladding*, Materials letters, 60 (2006) 1956-1959.
3. J. J. Kauzlarich, *The Palmgren-Miner rule derived*, Tribology Series, 14(1989), 175-179.
4. M. A. Miner, *Cumulative damage in fatigue*, Journal of Applied Mechanics. 12 (1945), 149-164.
5. Eskandari, H.; Kim, H. S. (2017). *A theory for mathematical framework and fatigue*

17. S. Akbarzadeh, M. M. Khonsari, *On the Applicability of Miner's Rule to Adhesive Wear*, Tribology Letters, 63 (2016) 24-29.
18. H. Fereidouni, S. Akbarzadeh, M. M. Khonsari. *On the assessment of variable loading in adhesive wear*, Tribology International, 129 (2019) 167-176.
19. KP. Lijesh, M. M. Khonsari, *On the Degradation of Tribo-components in Boundary and Mixed Lubrication Regimes*, Tribology Letters, 67 (2019) 1-12.
6. J. F. Archard, *Contact and rubbing of flat surfaces*, Journal of Applied Physics, 24 (1953) 981-988.
7. K. J. Miller, *An experimental linear cumulative-damage law*, Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 5(1970), 177-184.
8. I. Kraghelskii, *Friction and wear*. first ed. Washington. DC: Butterworth. Inc; 1965.
9. I. Al-Tubi, H. Long, P. Tavner, B. Shaw, J. Zhang, *Probabilistic analysis of gear flank micro-pitting risk in wind turbine gearbox using supervisory control and data acquisition data*, IET Renewable Power Generation, 9 (2015), 610-617.
10. S. Fouvry, P. Kapsa,, *An energy description of hard coating wear mechanisms*. Surfaces and Coating, Technology, 138 (2001) 141-148.
11. G. Savio, R. Meneghello, G. Concheri, *A surface roughness predictive model in deterministic polishing of ground glass moulds*, International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 49 (2009) 1-7.
12. A. Kassman, S. Jacobson, L. Erickson, P. Hedenqvist, M. Olsson, *A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coatings*, Surfaces and Coating Technology, 50 (1991) 75-84.
13. M. D. Bryant, M.M. Khonsari, F. Ling, *On the thermodynamic of degradation*. Proceeding of Royal Society A, 464 (2008) 2001-2014.
14. M. Amiri, M. M. Khonsari, S. Brakhmeshwarkar, *An application of dimensional analysis to entropy-wear relationship*, ASME Journal of Tribology 134 (2012) 1-5.
15. A. B. Aghdam, M.M. Khonsari, *Application of a thermodynamically based wear estimation methodology*, ASME Journal of Tribology, 138 (2016) 1-8.
16. M. D. Bryant, *Unification of friction and wear, Chapter 4*. In: Nikas, G. (ed.) Recent Developments in Wear Prevention Friction and Lubrication, pp. 159-196. Research Signpost, Kerala (2009). ISBN 978-81-308-0377-7