

مطالعه تجربی و تئوری اثر نیتراته کردن بر رفتار تماس لغزشی در دوره گذار

سایش

مهدی عطارزاده، صالح اکبرزاده، سید محمدرضا عباسپور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۰/۱۲ - پذیرش مقاله: ۹۶/۰۵/۲۹)

چکیده

افزایش مقاومت سایشی اجزای مکانیکی همواره برای سازندگان قطعات مکانیکی مهم بوده است. یک روش رایج برای عملیات سطحی، نیتراته کردن است. در این پژوهش، ضریب اصطکاک و حجم سایش دیسک‌های نیتراته شده و معمولی به دو صورت عددی و تجربی مطالعه شده است. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه تست سایش پین بر روی دیسک بر روی نمونه‌های فولاد AISI 4140 انجام شده است. مدل عددی بر پایه مفهوم تقسیم بار بمنظور پیش‌بینی ضریب اصطکاک، دمای سطح، ضخامت فیلم روان‌کار و نرخ سایش گسترش یافته است. نتایج برای دیسک‌های نیتراته شده نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، ضخامت فیلم روان‌کار افزایش یافته و در نتیجه حجم سایش کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش بار اعمالی، ضخامت فیلم روان‌کار کاهش یافته و در نتیجه حجم سایش افزایش می‌یابد. در مورد دیسک‌های نیتراته شده، حجم سایش فقط تابعی از بار اعمالی است و سرعت وابسته نیست. نمودارهای حجم سایش بر حسب مسافت لغزش نشان می‌دهد که دوره گذار تقریباً قبل از ۱۵۰۰ متر به پایان می‌رسد و بعد از آن نرخ سایش پایا می‌شود. مقایسه نتایج تجربی و تئوری ضریب اصطکاک و حجم سایش نشان می‌دهد که مدل تئوری ارائه شده توانایی قابل قبولی برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک و نرخ سایش در مواد عادی دارد.

واژه‌های کلیدی: دوره گذار سایش، دیسک‌های نیتراته شده، ضریب اصطکاک، پیش‌بینی سایش، روش تقسیم بار.

An Experimental and Theoretical Study on the Effect of Nitriding on the Running-In Behavior of Lubricated Sliding Contacts

Mehdi Attarzadeh, Saleh Akbarzadeh, Sayed Mohamadreza Abbaspour
Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

(Received 1 January 2017, accepted 20 August 2017)

Abstract

Enhancing the wear-resistance of mechanical elements is always of much interest for the end users as well as the manufacturers. One common method for surface treatment is nitriding. In this research, friction and wear of nitrided and un-nitrided disks are experimentally and numerically studied. The experiments are conducted using pin-on-disk test rig on samples made from 4140 steel. A numerical model based on the load-sharing concept has been developed to predict the friction coefficient, surfaces' temperature, film thickness, and wear rate. The lubricant temperature along with the friction coefficient is used to predict the wear volume using the fractional film defect theory. The results for un-nitrided disks indicate that increasing the speed results in a higher lubricant film thickness and thus the wear volume decreases. Increasing the applied load, on the other hand, results in a decrease in the film thickness and as a result the wear volume increases. In the nitrided case, the wear volume is a function of load only and does not depend on the speed. The diagrams of wear volume versus sliding distance shows a running-in period approximately before 1500 m after which the wear rate stabilizes. Friction coefficient and wear volume results are shown to be in an acceptable agreement with the simulation results.

Keywords: running-in, nitrided elements, friction coefficient, wear prediction, load-sharing concept.

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

مقدمه

دوره کاری هر جزو مکانیکی که تحت تماس لغزشی است مشتمل بر دوره گذار اولیه و دوره پایا است. دوره گذار مدت کوتاهی از عمر قطعه را شامل می‌شود، اما شرایط عملکرد در این دوره تاثیر مهمی بر سطح کارایی یک تجهیز در طول دوره حالت پایا آن دارد [۱]. در تماس‌های روان کاری شده، در ابتدای دوره گذار تعداد نسبتاً بالایی از زبری‌ها تماس‌های الاستیک و پلاستیک را تجربه می‌کنند. بتدریج نرخ سایش و ضریب اصطکاک پایدار می‌شود که نشان می‌دهد دوره گذار پایان یافته و دوره حالت پایا آغاز گشته است.

موضوع بررسی دوره گذار سایش قبلاً توسط سایر محققین مطالعه شده است. در سال ۱۹۹۶ ژن‌فانگ و همکاران [۲] آزمایش‌هایی بر روی تماس دیسک فولادی و پین‌های کامپوزیتی انجام دادند و بر روی اندازه ذرات سایشی و هم‌چنین رژیم سایش برای مواد مشخص استفاده شده بحث کردند. آن‌ها هم‌چنین یک مدل ساده بر پایه داده‌های تجربی بمنظور پیش‌بینی نرخ سایش در طول دوره گذار بدست آوردند. وانگ و همکاران [۳] به صورت تجربی بر تغییرات زبری سطح بعنوان تابعی از زمان در حین دوره گذار سایش در رژیم روان کاری، مطالعاتی انجام دادند. کومار و دیگران [۴] برازش منحنی‌هایی را بر پایه آزمایش‌های دوره گذار سایش انجام دادند تا پارامترهایی مثل تغییرات زبری و افزایش دما در طول دوره گذار در هندسه تماس نقطه‌ای را پیش‌بینی کنند. آن‌ها آزمایش‌هایی با استفاده از دستگاه گوی بر دیسک انجام دادند. وانگ و دیگران [۵] بر روی روان کاری و سایش تحت رژیم روان کاری مخلوط در دوره گذار مطالعه کردند و زبری سطح را پس از پایان دوره گذار پیش‌بینی کردند.

یک روش متداول در مدل‌سازی تماس‌ها تحت رژیم روان کاری مخلوط، استفاده از روش تقسیم بار است. ایده اصلی در مفهوم تقسیم بار این است که هنگامی که دو

سطح تحت رژیم روان کاری مخلوط با هم در تماس هستند، بخشی از بار توسط زبری‌ها و بخشی توسط فیلم روان کار تحمل می‌شود. در این روش معادلات مشهور در رژیم روان کاری فیلم کامل برای پیش‌بینی ضخامت فیلم و ضریب اصطکاک در رژیم روان کاری مخلوط اصلاح شده‌اند. این روش را برای اولین بار جانسون و همکاران گسترش دادند [۶]. بعدها گلنیک و شیپر این روش را به مسایل تماس خطی گسترش دادند [۷]. لو و همکاران [۸] روش تقسیم بار را بمنظور پیش‌بینی عملکرد یاتاقان‌های ژورنال تحت بارگذاری سنگین در رژیم روان کاری مخلوط به کار گرفتند. اکبرزاده و خوانساری تحلیل‌هایشان را به بررسی چرخ‌دنده‌های ساده تحت رژیم روان کاری مخلوط گسترش دادند [۹-۱۰]. بعدها آن‌ها به کمک مفهوم تقسیم بار رفتار دوره گذار در مساله تماس خطی در رژیم روان کاری مخلوط را پیش‌بینی کردند [۱۱-۱۳]. ابراهیمی سرست و اکبرزاده [۱۴] این روش را برای پیش‌بینی عملکرد چرخ‌دنده‌های مارپیچ به کار بردند. بهرامی قهنویه و همکاران [۱۵] مفهوم تقسیم بار را بمنظور مطالعه اثر شرایط عملکردی بر روی کارایی چرخ‌دنده‌های مخروطی به کار بردند. مسجدی و خوانساری [۱۶-۱۷] برازش منحنی‌هایی را بمنظور پیش‌بینی بار تحمل شده توسط زبری‌ها هم در مسایل تماس خطی و هم در مسایل تماس نقطه‌ای گسترش دادند.

یکی از فرآیندهای رایج برای افزایش کارایی چرخ‌دنده‌ها، نیتراته کردن سطح آن‌ها است. موضوع نیتراته کردن توجه بسیاری را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. مارتین و همکاران [۱۸] به صورت تجربی بر روی چرخ‌دنده‌های فولادی نیتراته شده و کربن‌دهی شده مطالعه کردند. نتایج نشان داد که چرخ‌دنده‌های فولادی کربن‌دهی شده عملکرد بهتری نسبت به چرخ‌دنده‌های فولادی نیتراته شده دارند. پادگرنیک و همکاران [۱۹] بر روی اثر نیتراته کردن فولاد AISI 1040 با پلاسما بر خواص اصطکاکی تحقیقاتی انجام دادند. نشان داده شد که خواص

به دست آمده تقریباً برابر 800HV شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای 610 درجه سلسیوس حرارت داده شدند تا به سختی نهایی 370HV رسیدند. نیتراسیون با 15% نیتروژن و 85% هیدروژن در دمای 520 درجه سلسیوس و تحت فشار 5 torr به مدت ۶ ساعت انجام شد. نمونه‌های نیترا ته شده سختی 580HV داشتند. پین‌ها از فولاد برینگ با سختی 800HV ساخته شده‌اند. روغن موتور SAE 10W40 در آزمایش‌ها بعنوان روان‌کار استفاده شده‌است. یک ترازوی دیجیتالی با دقت 0.0001 گرم بمنظور اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش استفاده شد. نمونه‌ها بمنظور دقت بهتر در اندازه‌گیری وزن در استون با استفاده از یک هم‌زن اولتراسونیک نگهداری می‌شدند.

شبیه‌سازی

در تماس پین و دیسک، یک ناحیه بیضوی تشکیل می‌شود که R_x و R_y به ترتیب قطر کوچک و قطر بزرگ آن هستند. ضخامت بدون بعد فیلم روان‌کار در تماس بیضوی فیلم کامل، H_c ، با استفاده از رابطه زیر به دست آمده است [۲۴]:

$$H_c = 2.69U_a^{0.67}G^{-0.53}W^{0.067}(1 - 0.61e^{-0.73k}) \quad (1)$$

ضخامت ابعادی فیلم نیز بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_c = H_c R_x \quad (2)$$

پارامترهای بدون بعد در معادله (۱) برپایه کار همراک [۲۴] به دست آمده‌اند. عدد بدون بعد مربوط به بار در زیر آمده است:

$$W = \frac{F_T}{E'R_x^2} \quad (3)$$

اصطکاکی فولاد AISI 1040 پس از نیترا ته شدن تحت شرایط خشک و روان‌کاری شده نسبت به فولاد سخت‌کاری شده بهبود یافته است. پادگر نیک و ویزینتین [۲۰-۲۱] بر روی اثر برزدهی و نیترا ته شدن بر روی خواص اصطکاکی آن مطالعه کردند. تعدادی از تست‌های سایش با استفاده از سایش پین روی دیسک صورت گرفت. تحلیل‌ها اثر انتقال لایه را برای موارد با ضریب اصطکاک پایین و بار افزایشی تایید کرد. در همه بارها نرخ سایش مخصوص پین‌های برنزی کمتر از نمونه‌های نیترا ته شدن بود. اکشای و همکاران [۲۲] و استایتا و همکاران [۲۳] اثر پلاسمای ضربه‌ای را بر روی خواص تریبولوژیکی فولاد AISI 4140 مطالعه کردند. آن‌ها خواص ریزساختاری، مکانیکی و تریبولوژیکی فولاد AISI 4140 نیترا ته شده به روش پلاسمای و هم‌چنین روش پلاسمای ضربه‌ای را در مقایسه با فولاد سخت‌کاری شده بررسی کردند.

در این پژوهش، رفتار دوران گذار سایش نمونه‌های ساده و نیترا ته شده در تماس لغزشی روان‌کاری شده بصورت تئوری و تجربی بررسی شده است. یک مدل برپایه مفهوم تقسیم بار بمنظور پیش‌بینی ضریب اصطکاک و هم‌چنین بار تحمل شده توسط زبری‌ها و فیلم روان‌کار ایجاد شده است. آزمایش‌ها با استفاده از تجهیزات پین روی دیسک بر روی نمونه‌های ساخته شده از فولاد AISI 4140 در دوره گذار سایش انجام شده است. سطح تعدادی از این دیسک‌ها نیترا ته شده است.

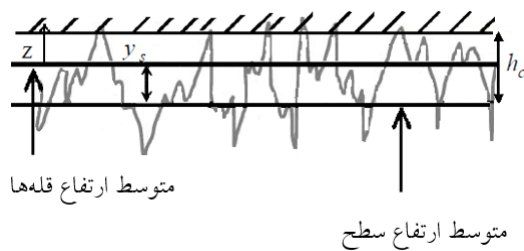
مطالعه تجربی

برای انجام آزمون‌های تجربی از دستگاه تست سایش پین روی دیسک استفاده شده است. دیسک‌ها با قطر 50 میلی‌متر و ضخامت 5 میلی‌متر از فولاد AISI 4140 ساخته شده‌اند. بمنظور افزایش سختی مواد، نمونه‌ها کوینچ شدند. دیسک‌ها در دمای 900 درجه سلسیوس به مدت ۱ ساعت نگهداری شده و سپس در روغن سرد شدند. سختی

فرورفتگی می شوند. این تغییر شکل ممکن است الاستیک، پلاستیک و یا الاستوپلاستیک باشد. بر پایه مقدار ضخامت فیلم، فرورفتگی ای که زبری i احساس می کند، w_i ، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$w_i = z_i - h_c + y_s \quad (9)$$

به این صورت که z_i ارتفاع زبری i است که از خط متوسط ارتفاع قله ها اندازه گیری می شود و y_s که فاصله بین خط متوسط سطح و خط متوسط ارتفاع قله ها است. شکل ۱ تماس یک سطح زبر با یک سطح صلب صیقلی را نشان می دهد.



شکل ۱. شماتیک تماس سطح زبر با یک سطح صیقلی صلب.

در این معادله [۲۵] y_s فاصله بین متوسط ارتفاع سطح ها و متوسط ارتفاع قله ها است. مقدار مثبت برای فرورفتگی یک زبری به این معناست که این زبری تماس را تجربه می کند. در حالی که مقدار منفی به این معناست که روان کار هرگونه تماس زبری ها را پر می کند. تماس زبری ها به دسته های الاستیک، الاستوپلاستیک یا پلاستیک دسته بندی شده اند. معیار برای این طبقه بندی، فرورفتگی هر زبری است. اگر فرورفتگی کوچکتر از w_e باشد، زبری می تواند به صورت الاستیک تغییر شکل یابد:

$$w_e = \left(0.94 \frac{H}{E'}\right)^2 \beta \quad (10)$$

به این صورت که F_T بار اعمال شده، R_x شعاع تماس بیضوی در جهت لغزشی و E' مدول الاستیک موثر است. پارامتر بدون بعد مربوط به سرعت به صورت زیر است:

$$U = \frac{V\eta}{E'R_x^2} \quad (4)$$

به صورتی که V سرعت موثر، η ویسکوزیته روان کار ورودی در دمای محیط است. عدد بدون بعد مربوط به جنس به صورت زیر تعریف شده است:

$$G = \xi E \quad (5)$$

به این صورت که ξ ضریب فشار-ویسکوزیته است. در رژیم روان کاری مخلوط، فیلم روان کار نمی تواند به طور کامل بار را تحمل نماید. بنابراین بار کل، F_T ، توسط روان کار با نیروی F_H و توسط زبری ها با نیروی F_C تحمل می شود.

$$F_T = F_C + F_H \quad (6)$$

ضرایب نسبت γ_1 و γ_2 به ترتیب به صورت نسبت معکوس بار تحمل شده توسط فیلم به بار کل و نسبت بار تحمل شده توسط زبری ها به بار کل معرفی شده اند.

$$\frac{F_T}{F_T} = \frac{F_C}{F_T} + \frac{F_H}{F_T} = \frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} = 1 \quad (7)$$

با اعمال تغییرات لازم در معادلات حاکم بر اساس روش تقسیم بار، معادله اصلاح شده ضخامت فیلم برای رژیم روان کاری مخلوط به صورت زیر به دست می آید:

$$H_c = 2.69 U_d^{0.67} G^{-0.53} W^{0.067} (1 - 0.61 e^{-0.73k}) \gamma_1^{0.14} \quad (8)$$

در رژیم روان کاری مخلوط، زبری ها نیز تماس خواهند داشت و در اثر تماس، زبری ها دچار تغییر شکل و یا

در اثر تماس لغزشی دو جسم گرما تولید می شود که میزان حرارت تولید شده از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۷]:

$$q_t = VPf \quad (16)$$

که در رابطه بالا V سرعت لغزش، P فشار تماس و f ضریب اصطکاک است. این حرارت بین پین، q_p ، و دیسک، q_d ، بوسیله یک ضریب تقسیم، α ، تقسیم می شود:

$$q_t = q_p + q_d \quad (17)$$

ضریب تقسیم به صورت زیر محاسبه می شود [۲۸]:

$$\alpha = \frac{\bar{q}_p}{\bar{q}_d} = \frac{\frac{1}{h_c} \left(\frac{R_x}{r_0^2} \right) + \frac{2.32}{k_d \sqrt{\pi(1.234 + Pe)}}}{\frac{1}{k_p} \left(\frac{4R_x L_p}{a^2} + \frac{3\pi}{8} \right)} \quad (18)$$

به این صورت که \bar{h}_c ضریب انتقال حرارت جابجایی، r_0 شعاع شیار، k_d ضریب انتقال حرارت هدایتی دیسک، k_p ضریب انتقال حرارتی پین، d قطر پین، L_p طول پین و Pe عدد پکلت است. افزایش دمایی را که در دیسک و پین رخ می دهد، می توان به صورت زیر نوشت:

$$T = T_{amb} + \Delta T_{ss} + \Delta T_f \quad (19)$$

در این معادله T_{amb} دمای محیط، ΔT_{ss} افزایش دمای پین و دیسک در حالت پایا را نشان می دهد، ΔT_f دمای جرقه زنی را نشان می دهد. دمای جرقه زنی برای دیسک با استفاده از معادله گرین وود [۲۹] محاسبه می شود.

$$\Delta T_f = \frac{2.32 q_d R_x}{k \sqrt{\pi(1.234 + Pe)}} \quad (20)$$

بنابراین ماکزیمم دمای پین و دیسک را می توان به صورت زیر نوشت:

$$T_{max_d} = T_{amb} + \bar{q}_d \left[\frac{1}{h_c} \left(\frac{R_x}{r_0} \right)^2 + \frac{2.32 R_x}{k_d \sqrt{\pi(1.234 + pe)}} \right] \quad (21)$$

به اینصورت که H سختی ماده است و β شعاع انحنای نوک زبری است. هم چنین فرض می شود هر زبری به طور پلاستیک تغییر شکل می یابد اگر فرورفتگی برابر w_p باشد:

$$w_p = 54w_e \quad (11)$$

همچنین فرض شده است که اگر میزان فرورفتگی بین w_e و w_p باشد، زبری در رژیم الاستوپلاستیک است. مساحت واقعی تماس و بار تحمل شده توسط زبری ها از رابطه زیر بدست می آید [۲۶]:

$$A_C = \sum A_{ei} + A_{epi} + A_{ep} \quad (12)$$

$$F_C = \sum F_{ei} + F_{epi} + F_{ep} \quad (13)$$

مساحت تماس واقعی برای زبری های در تماس در هر کدام از رژیم های الاستیک، پلاستیک و الاستوپلاستیک به صورت زیر است:

$$A_{ie} = \pi \beta_i \omega_i$$

$$A_{iep} = \pi \beta_i \omega_i \left(1 - 2 \left(\frac{w_i - w_e}{w_p - w_e} \right)^3 + \left(\frac{w_i - w_e}{w_p - w_e} \right)^2 \right) \quad (14)$$

$$A_{ip} = 2\pi \beta_i \omega_i$$

بر اساس رژیم تماس برای هر زبری، بار تحمل شده توسط هر زبری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F_{ie} = \frac{4}{3} E' \beta_i^{0.5} w_i^{1.5}$$

$$F_{iep} = \left(H - 0.6H \frac{\ln w_p - \ln w_i}{\ln w_p - \ln w_e} \right) \quad (15)$$

$$F_{ip} = H A_{ip}$$

در اثر تماس لغزشی، ذرات سایشی بوجود می‌آیند. رابطه آرچارد میزان حجم سایش را به صورت زیر بیان می‌کند [۳۰]:

$$wear = K \frac{F_T L}{H} \quad (22)$$

به این صورت که K ضریب سایش، H سختی دیسک، L مسافت لغزشی و F_T بار اعمالی است. در مورد تماس روان کاری شده، به علت وجود مولکول‌های روان کار روی سطوح در تماس و کاهش سطح واقعی تماس، معادله [۲۶] در محاسبه دقیق سایش توانا نیست. استولارسکی [۳۱] قانون آرچارد را بمنظور تخمین ضریب سایش برای تماس در حضور روان کار اصلاح نمود:

$$K_b = \psi K \quad (23)$$

در این معادله K_b ضریب سایش برای تماس خشک دو ماده و ψ [۳۲] پارامتر عیب کسری فیلم است:

$$\psi = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{a_x}{V_{t_0}} \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right)\right]\right\} \quad (24)$$

به این صورت که a_x قطر ناحیه همراه با مولکول جذب شده، t_0 زمان ارتعاش مولکول در حالت جذب سطحی، E_a ، T ، دمای ناشی از جذب سطحی روان کار روی سطح، R_g ثابت جهانی گازها است. این مقادیر در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. مقادیر استفاده شده برای پارامتر نقصان فیلم روان کار [۳۲].

| پارامتر | مقدار |
|-------------------------------------|-------------------------|
| قطر ناحیه همراه با مولکول جذب شده | 3×10^{-10} m |
| زمان ارتعاش مولکول در حالت جذب سطحی | 3×10^{-12} sec |
| حرارت ناشی از جذب | ۴۹ kJ/mole |

سطحی روان کار روی سطح

ثابت جهانی گازها 8.31
J/(mole.K)

با جایگذاری فرمول بندی بالا در قانون آرچارد، حجم سایش برای تماس روان کاری شده بدست می‌آید:

$$wear = K_b \frac{F_C L}{H} = K \psi \frac{F_C L}{H} = \frac{K \psi}{\gamma_2} \frac{F_T L}{H} \quad (25)$$

فرآیند حل

فرآیند شبیه سازی متشکل از دو برنامه است: برنامه اول که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای تعیین ضرایب نسبت کاربرد دارد. حل برای این مساله از در نظر گرفتن یک مقدار اولیه برای ضریب نسبت γ_1 برای فیلم سیال شروع می‌شود. سپس با به کارگیری معادله ۷ مقدار F_c محاسبه می‌شود. با استفاده از ضرایب نسبت فرض شده، ضخامت فیلم روان کار با به کارگیری معادله ۸ محاسبه می‌شود. فرورفتگی برای هر زبری در تماس و هم چنین سطح تماس و باری که تحمل می‌کند، محاسبه می‌گردد. مجموع بار و مجموع سطح تماس با جمع کردن بار تحمل شده و سطح تماس برای زبری‌های در تماس به دست می‌آید. سپس بار محاسبه شده برای زبری‌ها از رابطه ۲ و ۱۳ با هم مقایسه می‌شوند. اگر تفاوت بین این مقادیر بیش از دقت مشخص شده، که در این شبیه سازی ۰/۰۰۱ است، باید یک مقدار جدید برای γ_1 فرض شود و روند بالا تکرار شود.

شکل ۲ روندنمای قسمت اول برنامه عددی را نشان می‌دهد. در این بخش ضرایب نسبت تعیین می‌شوند و سپس دمای سطح محاسبه می‌گردد. شکل ۳ روندنمای محاسبه دمای سطح را نشان می‌دهد.

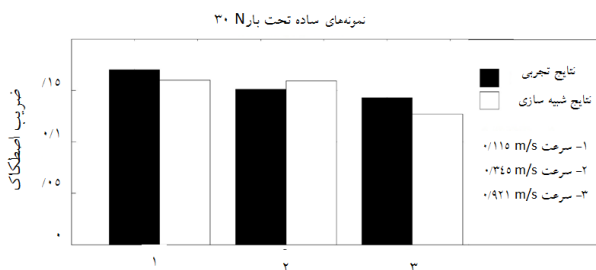
نتایج

در این بخش، در مورد نتایج آزمایش‌های سایش برای اجزای نیتراته شده و ساده به صورت جداگانه بحث می‌شود.

دیسک‌های ساده

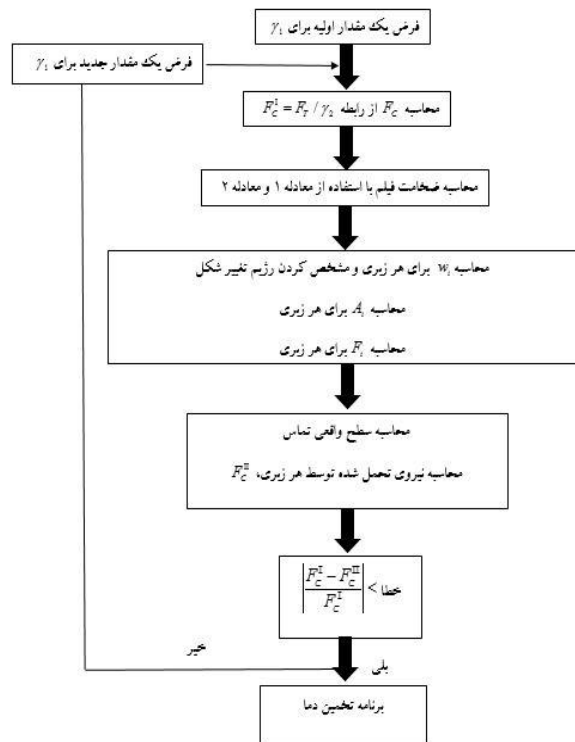
بر روی دیسک‌های نیتراته نشده (ساده) شش آزمایش انجام شد. در هر آزمایش، مجموع فاصله لغزش ۱۵۰۰ متر بوده و آزمایش بعد از هر ۳۰۰ متر بمنظور اندازه‌گیری سایش متوقف شده است. دیسک‌ها با استفاده از حمام استون تمیزکاری شده و وزن آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شده است.

شکل ۴ ضریب اصطکاک را برای همه آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ساده نشان می‌دهد. افزایش سرعت باعث تشکیل فیلم ضخیم‌تر روان‌کار و در نتیجه کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. از آنجایی که رژیم روان‌کاری، از نوع مخلوط است افزایش بار اعمالی، کاهش ضریب اصطکاک را در پی دارد.

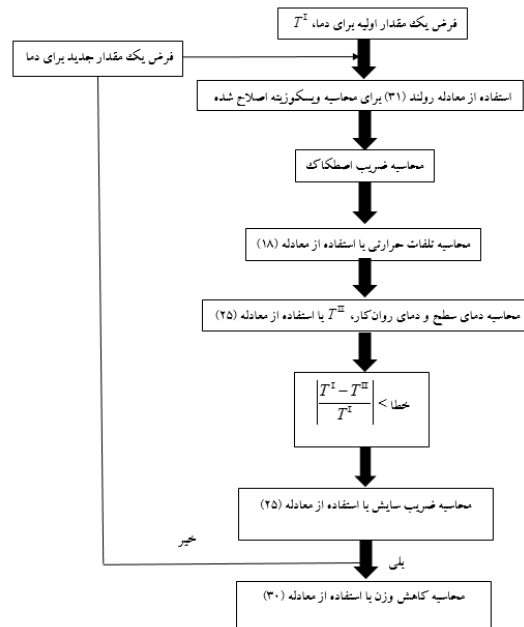


شکل ۴: ضریب اصطکاک نمونه‌های ساده.

شکل ۵ سیر کاهش وزن در طول آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. شیب این خطوط که نشان‌دهنده ضریب سایش است، با پایان یافتن دوره گذار و آغاز رژیم پایا دچار تغییر می‌شود. می‌توان مشاهده نمود که ضریب سایش در حالت پایا بسیار کوچک‌تر از ضریب سایش در دوره گذار است.

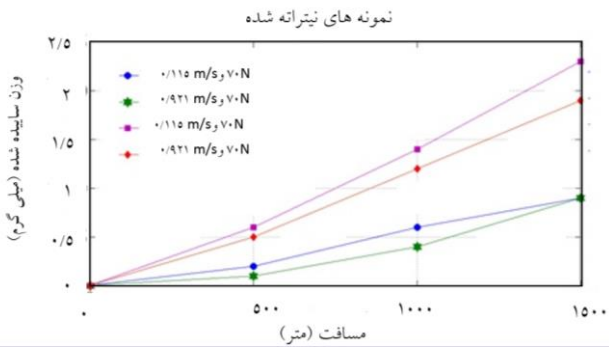


شکل ۲: روندنمای محاسبه ضرایب نسبت.



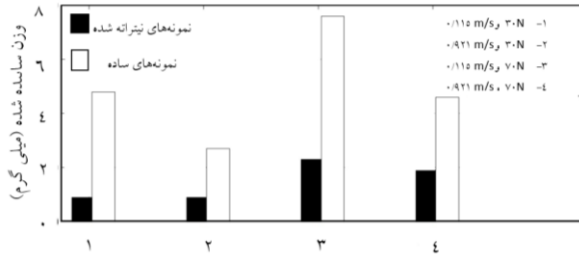
شکل ۳: روندنمای محاسبه دما.

می‌شود که کاهش وزن در دیسک‌های نیتراته شده به سرعت وابسته نیست و فقط تابعی از بار اعمالی است.



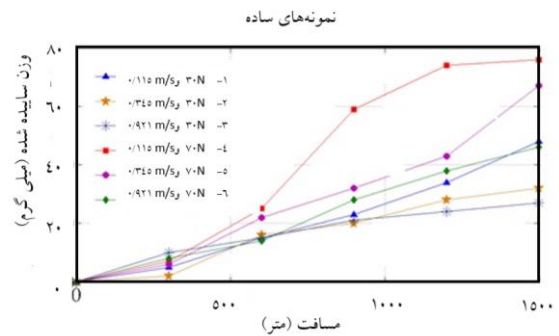
شکل ۷. حجم ساییده شده برای نمونه‌های نیتراته شده.

شکل ۸ نتایج کاهش وزن برای نمونه‌های نیتراته شده و ساده را مقایسه می‌کند. می‌توان مشاهده نمود که نیتراته کردن دیسک‌ها می‌تواند تا ۴ برابر کاهش وزن را کم کند.



شکل ۸. مقایسه حجم ساییده شده برای نمونه‌های ساده و نیتراته شده.

شکل ۹ مقایسه ضریب اصطکاک در نمونه‌های ساده و نیتراته شده را نشان می‌دهد. برخلاف نتایج کاهش وزن، ضریب اصطکاک در نمونه‌های نیتراته شده فقط اندکی کم‌تر از نمونه‌های ساده است.

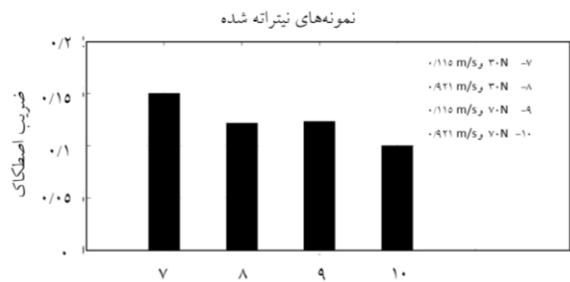


شکل ۵: حجم ساییده شده برای نمونه‌های ساده.

دیسک‌های نیتراته شده

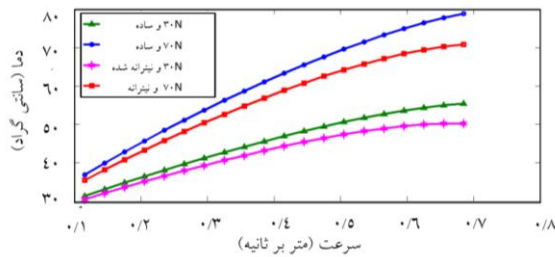
چهار آزمایش با استفاده از دیسک‌های نیتراته شده انجام شد. به دلیل کاهش وزن کم‌تر در دیسک‌های نیتراته شده، هر تست پس از ۵۰۰ متر متوقف شده است (به جای ۳۰۰ متر در دیسک‌های ساده) و اندازه‌گیری وزن صورت گرفت. مجموع مسافت لغزشی ۱۵۰۰ متر است.

شکل ۶، ضریب اصطکاک برای این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. نمودار، مشابه نمونه‌های ساده، نشان می‌دهد که افزایش در بار اعمالی و سرعت، کاهش ضریب اصطکاک را در پی خواهد داشت.



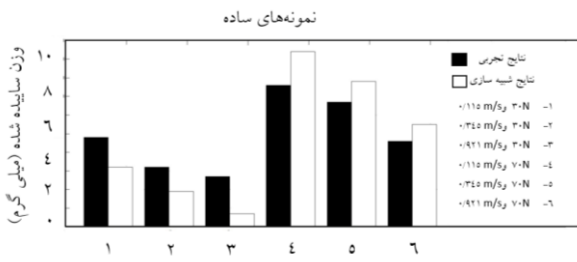
شکل ۶. ضریب اصطکاک برای نمونه‌های نیتراته شده.

شکل ۷ کاهش وزن بر حسب مسافت لغزشی را نمایش می‌دهد. اندازه‌گیری وزن نشان می‌دهد که در مسیر سایش، تغییر شیبی وجود ندارد. بعبارت دیگر، در دیسک‌های نیتراته شده، دوره گذار وجود ندارد. هم‌چنین مشاهده



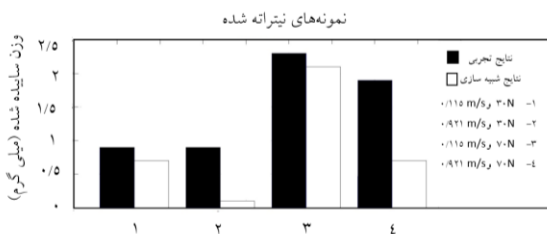
شکل ۱۱. تغییرات دما با سرعت.

با استفاده از معادلات ۲۴ و ۲۵، کاهش وزن برای نمونه‌های ساده و نیتراته شده پیش‌بینی شده است. شکل ۱۳ مقایسه بین کاهش وزن پیش‌بینی شده و کاهش وزن اندازه‌گیری شده در نمونه‌های ساده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. مقایسه نتایج تجربی و تئوری وزن ساییده شده.

در شکل ۱۴، مقایسه بین کاهش وزن پیش‌بینی شده و کاهش وزن اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های نیتراته شده آورده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که فرمول پیش‌بینی سایش که در این مقاله استفاده شده برای نمونه‌های ساده تا حد قابل قبولی معتبر است اما برای نمونه‌های نیتراته شده دارای خطا است.



شکل ۱۳ مقایسه نتایج تجربی و تئوری وزن ساییده شده.

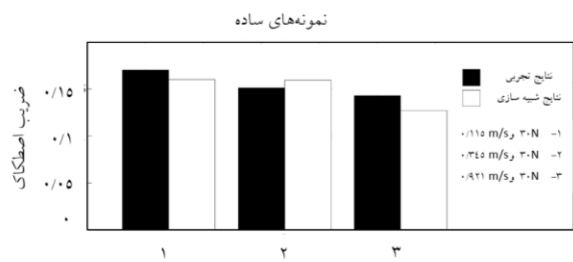
کاهش وزن اندازه‌گیری شده در این آزمایش‌ها از دیدگاه انرژی تلف شده نیز قابل ملاحظه است. اقدام و خوانساری



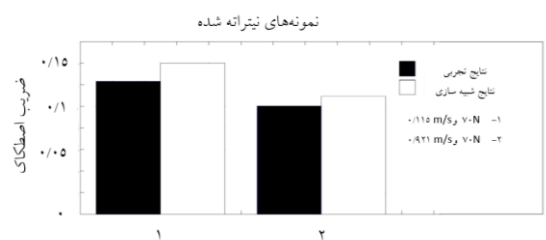
شکل ۸. مقایسه ضریب اصطکاک برای نمونه‌های ساده و نیتراته شده.

نتایج شبیه‌سازی

ضرایب اصطکاک پیش‌بینی شده برای دیسک‌های ساده و نیتراته شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت سبب تشکیل فیلم ضخیم‌تری از روان‌کار شده که این امر در رژیم روان‌کاری مخلوط باعث ضریب اصطکاک کم‌تر می‌شود.



شکل ۹. مقایسه نتایج تجربی و تئوری ضریب اصطکاک.



شکل ۱۰. مقایسه نتایج تجربی و تئوری ضریب اصطکاک.

شکل ۱۲ دمای پیش‌بینی شده برای نمونه‌های ساده و نیتراته شده را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت لغزشی، حرارت بیشتری تولید شده که باعث افزایش دمای پین و دیسک می‌گردد.

اصطکاک شد. مدلی بر پایه مفهوم تقسیم بار بمنظور پیش‌بینی ضریب اصطکاک، افزایش دما و نرخ سایش گسترش داده شده است. ضریب اصطکاک و کاهش وزن پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای دیسک‌های ساده از تطابق قابل قبولی برخوردارند. ضرایب PTR و WED برای دیسک‌های ساده و نیترا ته شده اندازه‌گیری شده‌اند.

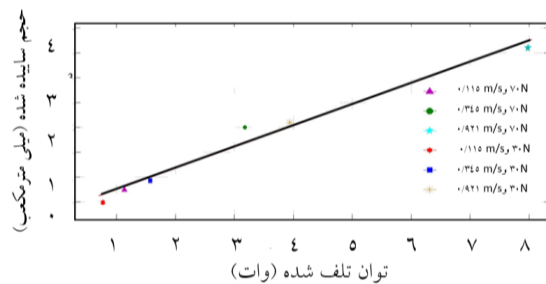
فهرست علائم

| | |
|------------|---|
| A_H | سطح تماس سیال، m^2 |
| a_x | قطر ناحیه با جذب سطحی مولکول، m |
| d | قطر پین، m |
| E_a | حرارت جذب شده توسط روان کار روی سطح، kJ/mole |
| E' | مدول الاستیک موثر، $\frac{2}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ |
| γ_1 | بار زبری، N |
| F_H | بار سیال، N |
| $F_{f.H}$ | نیروی اصطکاک هیدرودینامیکی، N |
| F_t | نیروی عمودی کل، N |
| f | نیروی اصطکاک کل، N |
| f_c | متوسط ضریب اصطکاک زبری |
| G | عدد بدون بعد ماده |
| H | ضخامت بدون بعد فیلم، Pa |

[۳۳] نشان دادند که کاهش وزن و انرژی تلف شده به واسطه یک ضریب به نام WED (سایش- انرژی تلف شده) به هم وابسته هستند.

$$W_{ave} = \psi_w P_d \quad (26)$$

به صورتی که W_{ave} متوسط نرخ سایش، ψ_w ضریب WED است. نشان داده شده است که این ضریب مستقل از شرایط عملکردی مثل نیروی عمودی، سرعت و ضریب اصطکاک است. شکل ۱۵ نرخ سایش بر حسب تلف شده برای دیسک‌های نیترا ته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: نرخ سایش بر حسب توان تلف شده

نتیجه‌گیری

مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه تست سایش پین روی دیسک طراحی شده و بر روی نمونه‌های نیترا ته شده و ساده اجرا شده است. داده‌های اندازه‌گیری وزن نشان می‌دهد که دوره گذار بیشتر در نمونه‌های ساده قابل مشاهده است. علاوه بر این کاهش وزن در نمونه‌های نیترا ته شده تابع سرعت نیست و فقط بعنوان تابعی از بار اعمالی تغییر می‌کند. مقایسه کاهش وزن در دو مورد نشان می‌دهد که کاهش وزن در نمونه‌های ساده تا ۴ برابر بزرگ‌تر از نمونه‌های نیترا ته شده تحت شرایط عملکردی یکسان است. ضریب اصطکاک برای دیسک‌های نیترا ته شده ۱۱٪ تا ۱۹٪ کم‌تر از دیسک‌های ساده بود. افزایش سرعت و بار اعمالی در هر دو مورد سبب کاهش ضریب

| | | | |
|-------------|---------------------------------------|-----------------|--|
| H_c | ضخامت بدون بعد فیلم، Pa | ΔT_f | دمای جرقه موضعی، °C |
| h_c | ضخامت فیلم، m | T_0 | دما در فشار اتمسفر، °C |
| \bar{h}_c | ضریب انتقال حرارت جابجایی، $W/m^2.K$ | ΔT_{ss} | دمای حالت پایا، °C |
| k | ضریب سایش | t_0 | زمان ارتعاش بنیادی مولکول در حالت جذب سطحی، s |
| K_b | ضریب سایش روان کاری مرزی | u | سرعت در مسیر لغزشی، m/s |
| k_d | ضریب انتقال حرارت هدایتی دیسک، W/mK | v | سرعت عمود بر مسیر لغزشی، m/s |
| k_p | ضریب انتقال حرارت هدایتی پین، W/mK | U_d | عدد بدون بعد سرعت |
| L | مسافت لغزشی، m | V | سرعت موثر، m/s $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ |
| L_p | طول پین، m | W | عدد بدون بعد بار |
| P_H | فشار هیدرو دینامیکی، Pa | y_s | فاصله بین خط متوسط سطح و خط متوسط قله های سطح، m |
| Pe | عدد پکلت | z_i | ارتفاع زبری از خط متوسط ارتفاع قله ها، m |
| R_g | ثابت گاز، J/mole.K | Z_p | شاخص ویسکوزیته - فشار |
| R_x | شعاع تماس بیضوی، m | ψ | ضریب عیب کسری فیلم |
| r_o | شعاع دیسک، m | η | ویسکوزیته روان کار، Pa.s |
| T | دمای مطلق سطح، K | η_0 | ویسکوزیته روان کار در فشار اتمسفر، Pa.s |
| T_{amb} | دمای محیط، °C | σ_s | انحراف معیار ارتفاع قله ها، m |

10. S. Akbarzadeh, M.M. Khonsari, *Thermoelastohydrodynamic analysis of spur gears with consideration of spur gears*, Tribology Letters, 32 (2008) 129–141.
11. S. Akbarzadeh, M.M. Khonsari, *On the prediction of running-in behavior in mixed-lubrication line contact*, ASME Journal of Tribology, 32 (2010) 032102-112.
12. S. Akbarzadeh, M.M. Khonsari, *Experimental and theoretical investigation of running-in*, Tribology International, 44 (2011) 92–100.
13. S. Akbarzadeh, M. M. Khonsari, *On the optimization of running-in operating conditions in applications involving EHL line contact*, Wear, 303 (2013) 130-137.
14. A. Ebrahimi Serest, S. Akbarzadeh, *Mixed-elastohydrodynamic analysis of helical gears using load-sharing concept*, Proc I Mech E part J: Journal of Engineering Tribology, 228(2014) 320-331.
15. A. Bahrami Ghahnavieh, S. Akbarzadeh, P. Mosaddegh, *A numerical study on the performance of straight bevel gears operating under mixed-lubrication regime*, Mechanism and Machine Theory, 75(2014) 27-40.
16. M. Masjedi, M. M. Khonsari, *Film thickness and asperity load formulas for line-contact elastohydrodynamic lubrication with provision for surface roughness*, ASME Journal of Tribology 134 (2012) 011503.
17. M. Masjedi, M. M. Khonsari, *On the Effect of Surface Roughness in Point-Contact EHL: Formulas for Film Thickness and Asperity Load*, Tribology International, 82(2015) 228-244.
18. R.C. Martins, N.F.R. Cardoso, H. Bock, A. Igartua, J.H.O. Seabra, *Power loss performance of high pressure nitrided steel gears*, Tribology International, 42 (2009) 1807–1815.
19. B. Podgornik, J. Vižintin, V Leskovšek, *Tribological properties of plasma and pulse plasma nitrided AISI 4140 steel*, Surface and Coatings Technology, 108 (1998) 454-460
20. B. Podgornik, J Vižintin, *Wear resistance of pulse plasma nitrided AISI 4140 and A355 steels*, Materials Science and Engineering: A, 315 (2001) 28-34.
21. B. Podgornik, J. Vižintin, *Tribological properties of plasma nitrided AISI 4140 steel underdry and lubricated sliding conditions*. Tribotest, 6 (2000) 357–371.
22. A. A. Joshi , S. S. Hosmani , J. Dumbre, *Tribological Performance of Boronized*,

| | |
|-----------------------|------------|
| ضریب فشار - ویسکوزیته | ξ |
| تنش برشی روان کار | τ_H |
| توزیع شار حرارت | α |
| سرعت زاویه‌ای، rad/s | ω |
| ضریب نسبت فیلم سیال | γ_1 |
| ضریب نسبت زبری | γ_2 |

مراجع

1. P.J. Blau, *On the nature of running-in*, Tribology International 38 (2005) 1007–1012.
2. Z. Zhenfang , Z. Liangchi, M. Yiu-Wing, *The running-in wear of a steel/Sic-Al composite system*, Wear, 194 (1996) 38-43.
3. W. Wang, P.L. Wong, Z. Zhang *Experimental study of the real time change in surface roughness during running-in for PEHL contacts*, Wear 244 (2000) 140–146.
4. R. Kumar, B. Prakash, A. Sethuramiah, *A systematic methodology to characterise the running-in and steady-state wear processes*, Wear 252 (2002) 445-453
5. W. Wang , P.L. Wong, F. Guoc, *Application of partial elastohydrodynamic lubrication analysis in dynamic wear study for running-in*, Wear 257 (2004) 823–832.
6. K.L. Johnson, J.A. Greenwood, S.Y. Poon, *A simple theory of asperity contact in elastohydrodynamic lubrication*, Wear, 19 (1972) 91-108.
7. E. R. M. Gelinck, D. J. Schipper, *Calculation of Stribeck curves for line contact*, Tribology International, 22 (2000) 175-181.
8. X.B. Lu, M.M. Khonsari, E.R.M. Gelinck, *The stribeck curve: experimental results and theoretical prediction*, ASME J. Tribology, 128 (2006) 789-794.
9. S. Akbarzadeh, M. M. Khonsari, *Performance of spur gears considering surface roughness and shear-thinning lubricant*, ASME Journal of Tribology, 130 (2008) 021503-10.

- Nitrided, and Normalized AISI 4140 Steel against Hydrogenated Diamond-Like Carbon-Coated AISI D2 Steel*, Tribology Transactions, 58 (2015) 500-510.
23. M.H. Staia , A. Fragiél , J. Machado , S.P.Brühl , Feugeas J. , Feugeas J., B.J. Gomez, *Tribological properties of pulsed ion nitrided AISI 4140 steel*, Surface Engineering , 15 (1999)313-316.
24. B.J. Hamrock *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw Hill, New York, 1994.
25. D.J. Whitehouse, J.F. Archard, *The properties of random surfaces of significance in their contact*, in Proc. of Royal Society 316 (1970) 97–121.
26. Y. Zhao, D. M. Maietta, and L. Chang, *An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow*, ASME Journal of Tribology, 122 (2000) 86-93,
27. F.E. Kennedy, Y. Lu, I. Bakerw, *Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting*, Tribology International, 82(2015) 534-542.
28. X. Tian, F.E. Kennedy, *Contact surface temperature models for finite bodies in dry and boundary lubricated sliding contact*, ASME J. Tribology, 115 (1993) 411-418.
29. J.A. Greenwood, *An interpolation formula for flash temperatures*, Wear, 150 (1991) 153-158.
30. J.F. Archard, *Contact and rubbing of flat surfaces*, Applied Physics, 24 (1953) 981-988.
31. T.A. Stolarski, *Adhesive Wear of Lubricated Contacts*, Tribol International, 12 (1979) 169-179.
32. E.P. Kingsbury, *Some aspects of the thermal desorption of a boundary lubricant*, Journal of Applied Physics, (1958) 888-891.
33. A. B. Aghdam, M.M. Khonsari, *Prediction of wear in grease-lubricated journal bearings via energy-based approach*, Wear, 318 (2014) 188-201.