



Numerical and Experimental Investigation of Wear in Nanostructured Tin Coating on Steel Substrate

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Nikueimanesh A.¹ MSc,
Akbarzadeh S.*¹ PhD

How to cite this article

Nikueimanesh A, Akbarzadeh S. Numerical and Experimental Investigation of Wear in Nanostructured Tin Coating on Steel Substrate. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):149-155.

ABSTRACT

Wear is one of the most detrimental mechanisms which can affect the performance of many industrial systems. TiN coating due to its unique properties such as resistance to wear, oxidation, and heat is widely used in mechanical elements. In this research, TiN coating has been coated on steel substrate using a physical vapor deposition method. The coating's properties have been obtained using nano-indentation test. Pin on disk wear test has been conducted while the disks are coated. The tests are conducted under three different loads and different speeds. It was shown that the samples with thicker coating show a better tribological performance. In this study, the relationship between wear and entropy has been investigated in order to predict the wear rate for different materials by predicting temperature. Also, temperature changes over time were predicted in two states of with and without coating. It was also shown that the samples with thicker coating have better wear resistance. One of the innovations of this research is the ability to establishing a correlation between the wear rate and produced temperature.

Keywords Wear Temperature Relation; Pin On Disk Test; Tin Coating; Wear; Finite Element Analysis

¹Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Postal code: 8415683111
Phone: +98 (31) 33915215
Fax: +98 (31) 33912627
s.akbarzadeh@cc.iut.ac.ir

Article History

Received: October 22, 2018
Accepted: May 7, 2019
ePublished: January 01, 2020

CITATION LINKS

[1] Some thoughts on sliding wear [2] Experimental investigation on the effect of operating conditions on the running-in behavior of lubricated elliptical contacts [3] Simulating sliding wear with finite element method [4] Finite element simulation of the wear of polyoxymethylene in pin-on-disc configuration [5] Adaptive finite element simulation of wear evolution in radial sliding bearings [6] Finite element based simulation of dry sliding wear [7] Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer [8] Development of a simulation tool for wear in microsystems [9] A finite element analysis of the frictional forces between a cylindrical bearing element and MoS₂ coated and uncoated surfaces [10] Assessing the role of particle shape and scale in abrasion using 'sharpness analysis': Part I. Technique development [11] Simulation of three-dimensional abrasive Particles [12] A finite element approach to modeling abrasive wear modes [13] A predictive modeling scheme for wear in tribometers [14] Predicting the wear coefficient and friction coefficient in dry point contact using continuum damage mechanics [15] Finite element implementation and validation of wear modelling in sliding polymer-metal contacts [16] Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test [17] Topography-related effects on the lubrication of nanostructured hard surfaces [18] Friction and wear of nanostructured metals created by large strain extrusion machining [19] On the relationship between wear and thermal response in sliding systems [20] An application of dimensional analysis to entropy-wear relationship [21] Experimental and finite element simulation of wear in nanostructured NiAl coating

بررسی تجربی و عددی سایش در پوشش نانو ساختار تیتانیوم نیتراید TiN بر پایه فولادی

علی نیکویی‌منش MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

صالح اکبرزاده * PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

سایش از جمله مکانیزم‌های مخربی است که می‌تواند عملکرد بسیاری از سیستم‌های صنعتی را تحت الشعاع قرار دهد. پوشش نیتراید تیتانیوم (TiN) به دلیل داشتن خواص منحصر به فردی همچون مقاومت به حرارت و اکسیداسیون بالا و مقاومت زیاد به سایش، در بسیاری از قطعات صنعتی به منظور تقویت مقاومت به خوردگی، اکسیداسیون و سایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کار حاضر پوشش نانو ساختار TiN با روش رسوب‌دهی فیزیکی بخار روی پایه‌ای فولادی نشانداده شده است. خواص پوشش با استفاده از آزمون نانوفرورش به دست آمده است و آزمون سایش پین روی دیسک روی سه نمونه متفاوت در بارگذاری و سرعت‌های مختلف انجام شده است که در نتیجه آن، نمونه با ضخامت پوشش بالاتر، مقاومت به سایش بالاتری را از خود نشان می‌دهد. فرآیند سایش به دلیل ماهیت غیرقابل بازگشت آن باعث افزایش آنتروپی سیستم می‌شود. در قسمت تحلیلی کار حاضر با استفاده از دمای به دست آمده از روش المان محدود، ارتباط بین دما و نرخ سایش و همچنین نرخ تولید آنتروپی و نرخ سایش مطالعه شده است. مشاهده شد که پوشش با ضخامت بالاتر مقاومت به سایش بهتری نشان می‌دهد. در این پژوهش، ارتباط بین سایش و آنتروپی بررسی شده است که بتوان برای مواد مختلف با پیش‌بینی دما میزان سایش را نیز پیش‌بینی کرد. همچنین به کمک روش اجزای محدود، تغییرات دما با زمان در دو سطح با پوشش و بدون پوشش نیز پیش‌بینی شد. یکی از نوآوری‌های این تحقیق، در قابلیت ارتباط بین میزان سایش و حرارت تولید شده است.

کلیدواژه‌ها: ارتباط سایش با دما، آزمایش پین روی دیسک، پوشش نیتراید تیتانیوم، سایش، تحلیل اجزای محدود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۷

*نویسنده مسئول: s.akbarzadeh@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

سایش باعث کاهش کارایی قطعات صنعتی، افزایش تلفات انرژی، افزایش مصرف روغن و همچنین نرخ تعویض قطعات می‌شود. تحقیقات انجام‌شده در کشورهای صنعتی، صرف هزینه‌ای بالغ بر ۵ تا ۱۰٪ تولید ناخالص ملی در برخورد با مسئله سایش و اصطکاک را نشان می‌دهد [1, 2]. مکانیزم‌های مختلفی برای کاهش سایش وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از فناوری پوشش‌دهی قطعات است. به دلیل خواص و ویژگی‌های منحصربه‌فرد نیتراید تیتانیوم (TiN)، این ماده کاربردهای گسترده‌ای در صنعت یافته است. مثلاً در صنعت میکروالکترونیک، به عنوان سد الکتریکی استفاده می‌شود یا به سبب مقاومت بالا در برابر سایش در قطعات آن، بهره گرفته می‌شود.

مطالعات انجام‌شده در زمینه سایش از یک جهت مربوط به متالورژی و نوع مکانیزم‌های فعال در ایجاد سایش و از جهت دیگر مربوط به

شبیه‌سازی پدیده سایش با استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود است.

پودرا و آندرسون به شبیه‌سازی سایش لغزشی فولاد بر فولاد در نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS پرداختند [3]. آن‌ها نرخ سایش را از آزمون پین کروی روی دیسک به دست آوردند. سپس با استفاده از قانون سایش آرچارد و مدلی تقارن محوری و دوبعدی، این آزمایش را شبیه‌سازی نمودند.

بن‌عبدله و آندر به شبیه‌سازی سایش آزمون پین پلیمری روی دیسک فولادی در نرم‌افزار ANSYS پرداختند. مدل‌سازی آن‌ها به صورت دوبعدی و کرنش صفحه‌ای صورت گرفته و از اثرات حرارتی و زبری سطح، صرف نظر شده است [4].

رضایی و همکاران به شبیه‌سازی سایش در یاتاقان لغزشی شعاعی از جنس کامپوزیت پلیمری در نرم‌افزار ABAQUS پرداخت. در الگوریتم مورد استفاده او، علاوه بر المان‌های تماسی، المان‌های مجاور نیز مجدداً شبکه‌بندی می‌شوند. به کمک این روش، شبیه‌سازی مستقل از سائز المان تماسی است. در این شبیه‌سازی تأثیر میزان لقی یاتاقان شعاعی بر سایش نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل‌شده حاکی از آن است که میزان لقی بر عمق سایش اثر مستقیم دارد، درحالی که بر حجم سایش تأثیر چندانی ندارد [5]. هگادکات به شبیه‌سازی سایش لغزشی بدون روانکاری در ماشین‌های ابعاد میکرو پرداخت [6]. الگوریتم مفروض، چون بر مبنای فرضیاتی از جمله فشار تماس میانگین در منطقه سایش و همچنین عدم در نظر گرفتن نیروی اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک است، فقط در موارد خاص و تغییر شکل‌های کوچک معتبر است.

هگادکات و همکاران تحلیل المان محدود تماس و سایش لغزشی را انجام دادند [7, 8]. لاول و همکاران به بررسی نیروی اصطکاک بین دو سطح یاتاقانی که دارای پوشش MoS2 است پرداختند [9]. دی‌پلگرس و استاکوویا به شبیه‌سازی سایش خراشان به صورت سه‌بعدی پرداختند [11]. ولدمن و همکاران با انجام شبیه‌سازی المان محدود و همچنین آزمایش‌های تجربی سایش خراشان در قطعات مکانیکی را بررسی کردند [12].

در ادامه، کاناولی در زیربرنامه‌ای در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی سایشی لغزشی- غلشی بدون روانکار دو دیسک را پیاده‌سازی نمود و سایش سه‌بعدی در پین و دیسک در آزمایش پین روی دیسک و دو دیسک می‌پردازد را بررسی نمود [13]. نتایج حاصل از کار او مطابقت خوبی با نتایج تجربی و نتایج حاصل از رساله هگادکات داشت.

قطره‌سامانی و اکبرزاده به بررسی تماس لغزشی سطوح در حالت خشک پرداختند و با ارائه مدلی که براساس مکانیک آسیب است به پیش‌بینی ضریب سایش پرداختند [14].

مارتینز و بورتولتو نیز به صورت جداگانه به بررسی رفتار اصطکاکی و سایشی فلزات پرداختند و مدل‌سازی را به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS برای پین و دیسک فولادی با خواص الاستیک- پلاستیک انجام دادند [15, 16]. گریگ و همکاران، تأثیر ساختار

بررسی تجربی و عددی سایش در پوشش نانوساختار تیتانیوم نیتراید TiN بر پایه فولادی ۱۵۱
جدول (۱) نتایج حاصل از آزمون نانوفروبرش برای نمونه با ضخامت ۵/۵ میکرون

نوع تست	داده‌های به‌دست‌آمده
H_{it} (MPa)	۱۰۷۶/۴۱۶
HV (Vickers)	۹۹۶/۶۲۴
E_{it} (GPa)	۲۳۸/۷۴۷

جدول (۲) نتایج حاصل از آزمون نانوفروبرش برای نمونه با ضخامت ۵ میکرون

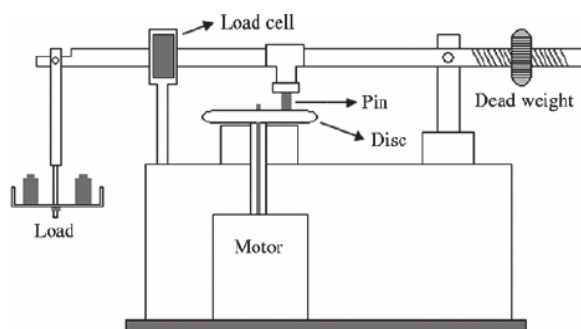
نوع تست	داده‌های به‌دست‌آمده
H_{it} (MPa)	۲۴۳۷۶/۵۸۰
HV (Vickers)	۲۲۵۷/۵۳۷
E_{it} (GPa)	۳۰۸/۹۰۸

۲-۲- آزمون زبری‌سنجی

آزمون زبری‌سنجی انجام‌شده مقادیر R_a را برای نمونه بدون پوشش، با پوشش ۵/۵ میکرون و با پوشش ۵ میکرون به‌ترتیب ۰/۰۷۴، ۰/۰۷۷ و ۰/۰۹۱ میکرومتر گزارش داده است که برای نمونه‌ها در یک محدوده هستند. برای این اندازه‌گیری از دستگاه زبری‌سنج Mitutoyo استفاده شده است.

۳-۲- آزمون سایش

در این پژوهش، آزمایش‌های سایش با استفاده از یک دستگاه سایش پین روی دیسک انجام گرفته است (شکل ۱). پین مورد استفاده در این آزمون از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ است و در دو سرعت دورانی ۱۰۰ و ۱۲۰ دور بر دقیقه تست‌ها انجام شده است.



شکل (۱) شماتیک دستگاه آزمایش پین روی دیسک

هنگامی که قرار است روی ماده‌ای تست سایش انجام شود ابتدا باید بازه نیروهای اعمالی تعیین شوند. برای تعیین بازه نیروهای قابل اعمال از تستی به اسم بارپذیری استفاده می‌شود. در این تست نیروهای مختلفی برای مسافت لغزشی مشخصی اعمال می‌شوند و میزان سایش اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمودار نیروی میزان سایش برحسب نیروی اعمالی رسم می‌شود. منحنی بارپذیری مربوط به پوشش نانوساختار TiN اعمال‌شده در نمودار ۲ آورده شده است. برای استخراج این نمودار، نمونه‌ها تحت تست سایش در نیروهای مختلف برای مسافت لغزشی ثابتی قرار می‌گیرند و میزان سایش آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود با اعمال بار بیشتر از ۲۳۰ نیوتن، به‌تدریج بر میزان کاهش وزن افزوده می‌شود.

سطح، ویسکوزیته روغن و سرعت لغزش بر اصطکاک را با استفاده از نمونه پوشش‌های Cr-N بر قرص‌های Si بررسی نمودند [17].

ایگلسیاس و همکاران، مورفولوژی مواد مورد سایش، جابجایی لایه‌های تریبولوژیکی با استفاده از میکروسکوپ نوری و SEM، مقایسه این خواص در پوشش‌های مس و تیتانیوم در ابعاد میکرو و نانو را مورد بررسی قرار دادند [18].

میری و همکاران [19, 20] ارتباط بین سایش و افزایش درجه حرارت را در سیستم‌های تحت لغزش بررسی کردند. آن‌ها یک روش نیمه تجربی برای تعیین ضریب سایش بر پایه پاسخ حرارتی سیستم لغزشی ارائه کردند. در این بررسی نشان داده شد که درجه حرارت در فصل مشترک می‌تواند به‌طور موثری برای توصیف رفتار سیستم لغزشی در شرایط سایش حالت پایدار به‌کار برده شود. نتایج تجربی نشان داد که درجه حرارت‌های بالاتر ایجادشده ناشی از اتلاف انرژی بیشتر و در نتیجه نرخ سایش بیشتر است.

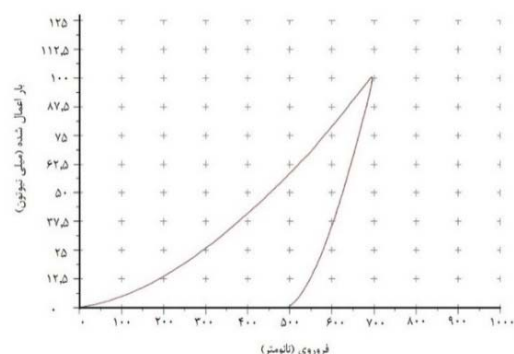
طاووسی و همکاران به بررسی تجربی و عددی سایش در ماده نانوساختار NiAl پرداختند و در آن با استفاده از روش مدل‌سازی عمومی سایش و روش اجزاء محدود به‌همراه پردازشگر سایش در نرم‌افزار آباکوس، به مدل‌کردن سایش پرداختند [21].

در این تحقیق آزمون‌های مختلفی انجام شده است و میزان سایش تحت بارهای مختلف برای قطعه پوشش‌دار اندازه‌گیری شده است. سپس به کمک تحلیل المان محدود میزان دما پیش‌بینی شده و ارتباط بین آنروپی تولیدشده و میزان سایش بررسی شده است. صحت‌سنجی این مدل با مقایسه دمای پیش‌بینی‌شده و دمای اندازه‌گیری‌شده انجام شده است.

۲- قسمت تجربی

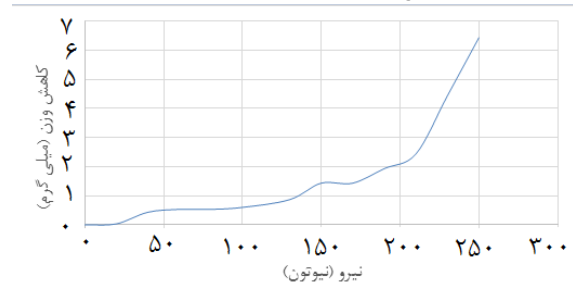
۱-۲- آزمون نانوفروبرش

آزمون نانوفروبرش روی نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه مدل NHTX در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفته است. نمودار ۱ منحنی عمق نفوذ سر فروبرنده برای نمونه با ضخامت ۵/۵ میکرون را نشان می‌دهد. در ادامه نتایج حاصل از این آزمون در جدول‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب برای نمونه‌های ۵/۵ و ۵ میکرون آورده شده است. HiT بیانگر سختی نمونه، E_{IT} ضریب الاستیک ماده هستند.



نمودار (۱) نمودار بار- عمق نفوذ برای نمونه با ضخامت ۵/۵ میکرون

همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از گذشت زمان و اضافه شدن مسافت در تمامی نمونه‌ها میزان سایش بیشتر می‌شود و طبیعتاً در بارهای بالاتر میزان سایش بیشتر است. البته در نمونه با پوشش ۵ میکرون هر سه بار نزدیک به یکدیگر هستند چون لایه مقاومت به سایش خود را همچنان داراست و کنده نشده است یعنی همان رفتاری که برای نمونه با ضخامت ۵/۵ میکرون در بارهای کمتر از ۲۱۰ نیوتون دیده می‌شود. در نمودار ۴ نمودار مربوط به سایش سه نمونه مورد آزمایش برای بارهای ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ نیوتون آورده شده است.

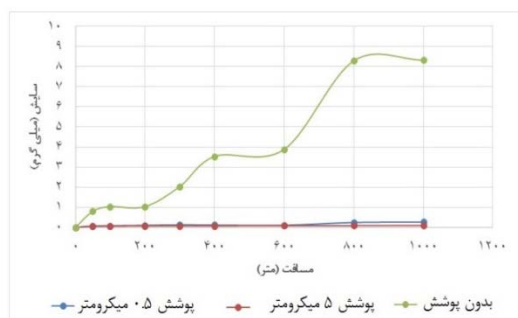


نمودار ۲) نمودار مربوط به تست بارپذیری با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه

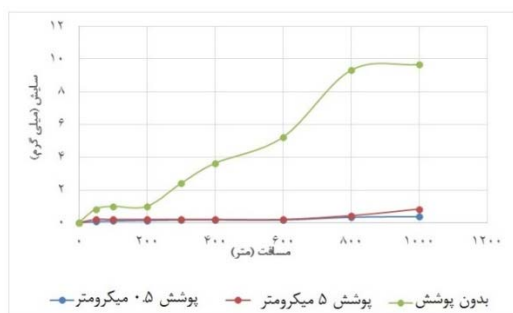
با توجه به آزمون بارپذیری، آزمون سایش تحت بارهای ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ نیوتون انجام گرفته است. قبل از آزمایش، نمونه‌ها و پین با دقت ۰/۱ میلی‌گرم توزین شده‌اند. مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر انتخاب و در مسافت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر، کاهش وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر میزان کاهش وزن پین نیز با دقت ۰/۱ میلی‌گرم ثبت شد.

محاسبه نرخ سایش پوشش مورد بررسی در آزمون سایش

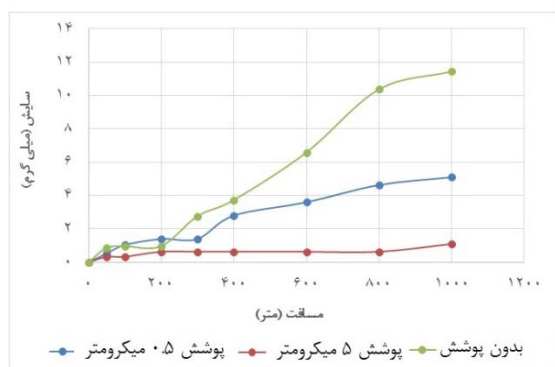
در نمودار ۳ نمودارهای مربوط به سایش سه نمونه خام، ضخامت ۵/۵ میکرون تحت بارهای ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ نیوتون آورده شده است.



(الف)



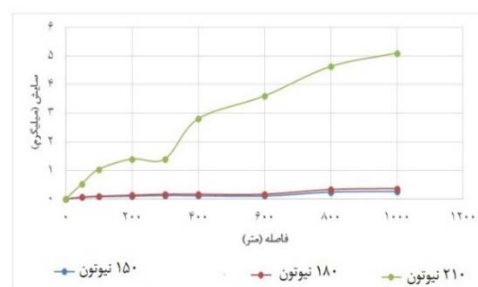
(ب)



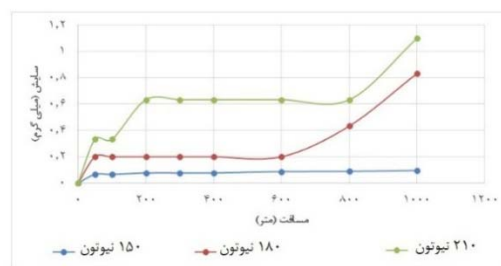
(ج)

نمودار ۴) نمودار مربوط به سایش سه نمونه مورد آزمایش برای بارهای الف) ۱۵۰، ب) ۱۸۰ و ج) ۲۱۰ نیوتون و سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه

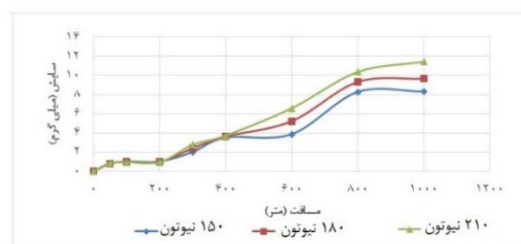
نمودار سایش از یک دوره گذرا و یک دوره پایا تشکیل شده است. در واقع شیب این نمودار مؤید وجود دو نوع رفتار سایشی متفاوت است. اما برای نمونه پوشش‌دار، نمی‌توان دو رژیم سایشی متفاوت مشخص نمود و میزان سایش نیز کمتر است. همچنین در نمونه با پوشش ۵ میکرومتری، میزان سایش به مراتب پایین‌تر است. نمودار



(الف)



(ب)



(ج)

نمودار ۳) نمودارهای مربوط به سایش سه نمونه با ضخامت: الف) ۵/۵ میکرون، ب) ۵ میکرون و ج) نمونه خام تحت بارهای ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ نیوتون و سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه

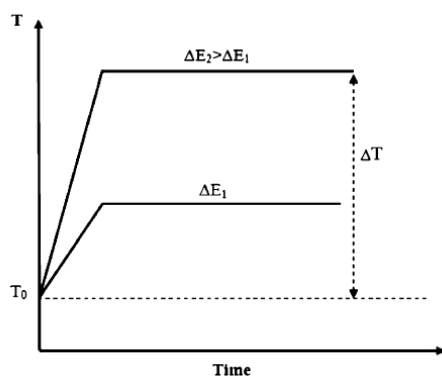
بر اساس مشاهدات نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب فاصله، ضریب اصطکاک به طور متوسط برای هر سه نمونه در محدوده‌ای بسیار نزدیک به ۰/۳۶ است. در مسافت‌های کوتاه، به دلیل حضور ناهمگونی‌های سطحی اتصال پایدار برقرار نشده و بنابراین ناهمگونی‌هایی در منحنی ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود. اما در مسیرهای طولانی‌تر سایش سطوح در تماس یکنواخت‌تر شده و لذا تغییرات ضریب اصطکاک نیز حالت یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد. محدوده تغییرات اصطکاک نیز قابل تأمل است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر سه بار اعمالی ضریب اصطکاک در محدوده ۰/۲ تا ۰/۵ تغییر می‌کند. علت گستردگی بازه ضریب اصطکاک می‌تواند به دلیل تشکیل حفرات ناشی از کندگی براده‌های سایش و حذف آن‌ها از روی سطح باشد که در اثر آن سطح ناهموار شده و به این ترتیب ضریب اصطکاک دچار تغییر می‌شود.

۵-۲- اندازه‌گیری دمای سطح

برای اندازه‌گیری دمای سطح از یک دوربین حرارتی ساخت شرکت Testo استفاده شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزایش درجه حرارت بیشتر در سطح تماس اتلاف انرژی بیشتری را به دنبال داشته و در نتیجه نرخ سایش بالاتری را منجر می‌شود. قابلیت کاربرد روش ارائه شده، محدود به استفاده در شرایط حالت پایدار می‌باشد که هیچ‌گونه تغییری در ترکیب سطح تماس اتفاق نیفتد. با مقایسه ضریب سایش آرچارد محاسبه شده در این روش با مقادیر منتشر شده جهت ارزیابی، تطابق خوبی مشاهده شد [21].

در ابتدا و به دلیل اینکه چگالی انرژی وابسته به کار اصطکاکی افزایش یافته و گرمای بیشتری نسبت به اتلاف گرمای هدایتی سطح تماس تولید می‌کند، درجه حرارت افزایش می‌یابد. پس از آن، درجه حرارت تقریباً ثابت باقی می‌ماند، همان‌طور که شرایط حالت پایدار ایجاد می‌شود.

نیروی اعمالی بیشتر، اتلاف انرژی بیشتری را در سطح تماس منجر شده و در نتیجه، درجه حرارت بالاتری در سطح تماس دو جسم ایجاد شده است. یک سیر تکاملی از درجه حرارت تجربی آرمانی در نمودار ۸ نمایش داده شده است.

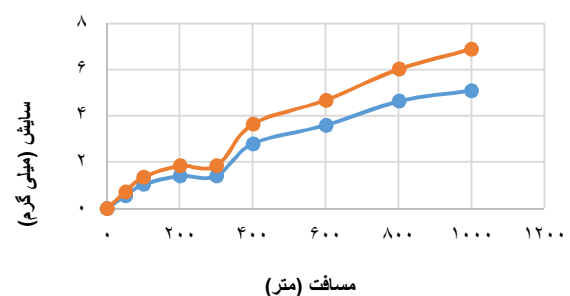


نمودار ۸) سیری تکاملی از درجه حرارت تجربی آرمانی

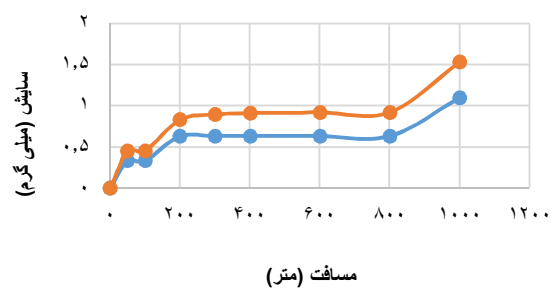
همان‌طور که مشخص است درجه حرارت سطح تماس در طول مرحله اول از آزمایش افزایش می‌یابد سپس در مرحله دوم تقریباً

۴ نشان می‌دهد که با افزایش نیروی اعمالی، میزان سایش برای نمونه بدون پوشش افزایش می‌یابد. نمونه‌های با پوشش ۵ میکرومتر کمترین میزان سایش را برای تمامی بارهای اعمالی دارند.

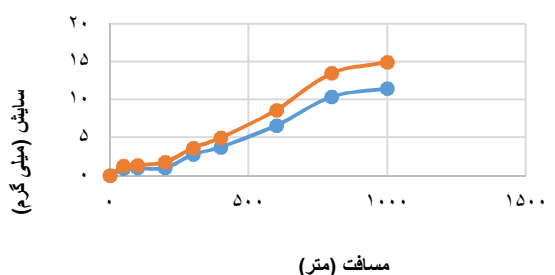
ضریب اصطکاک پوشش مورد بررسی در آزمون سایش در زیرنمودارهای مقایسه‌ای برای سرعت‌های دورانی ۱۰۰ و ۱۲۰ دور بر دقیقه آورده شده است (نمودارهای ۵، ۶ و ۷). همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد و طبق رابطه آرچارد میزان سایش به صورت خطی زیاد شده است ولی مقدار سایش کمی بیشتر از پیش‌بینی‌ها است که علت آن را در درگیر شدن عواملی چون دمای سطح می‌توان دانست و البته اینکه رابطه آرچارد برای شرایط خاصی به صورت کامل برقرار است.



نمودار ۵) نمودار مقایسه‌ای برای سرعت‌های دورانی ۱۰۰ و ۱۲۰ دور بر دقیقه برای نمونه با ضخامت ۰/۵ میکرون تحت بار ۲۱۰ نیوتون



نمودار ۶) نمودار مقایسه‌ای برای سرعت‌های دورانی ۱۰۰ و ۱۲۰ دور بر دقیقه برای نمونه با ضخامت ۵ میکرون تحت بار ۲۱۰ نیوتون



نمودار ۷) نمودار مقایسه‌ای برای سرعت‌های دورانی ۱۰۰ و ۱۲۰ دور بر دقیقه برای نمونه خام یا همان نمونه بدون پوشش تحت بار ۲۱۰ نیوتون

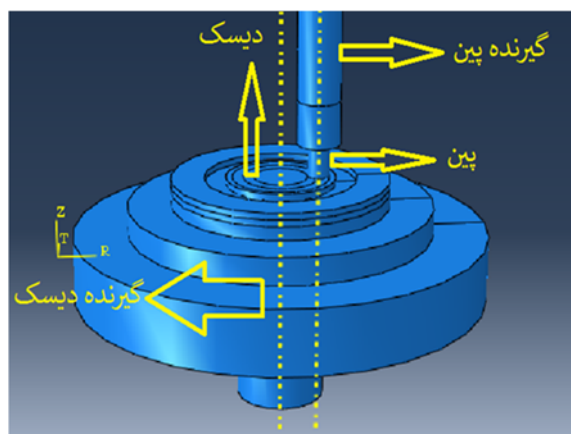
براساس این رابطه، حجم سایش V با نیروی اعمالی F و مسافت لغزشی d متناسب و با سختی ماده H رابطه عکس دارد. در این رابطه k ضریب سایش است.

۴- مدل‌سازی اجزاء محدود

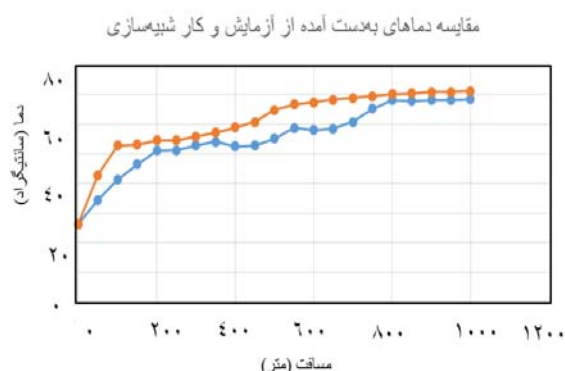
روش اجزاء محدود برای تحلیل گذرا استفاده شده است. خواص استفاده‌شده در تحلیل در جدول ۳ آمده است و همچنین شمانیک مسئله مورد تحلیل نیز در شکل ۲ آمده است. نمودار ۱۱ مقایسه بین دمای اندازه‌گیری‌شده و همچنین دمای محاسبه‌شده را برحسب مسافت لغزش نشان می‌دهد.

جدول ۳) خواص دیسک و گیرنده پین و دیسک

نام قطعه	جنس	چگالی (kg/m ³)	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
دیسک	فولاد ۲۰۸۰	۷۶۷۰	۲۰	۴۶۰
گیرنده پین	فولاد ۱۴۴۰	۷۹۳۰	۱۵	۵۰۲
گیرنده دیسک	فولاد ۳۰۳۰	۷۶۸۰	۲۴/۲	۴۶۰
پین	فولاد ۵۲۱۰۰	۷۸۳۰	۴۶/۶	۴۷۵



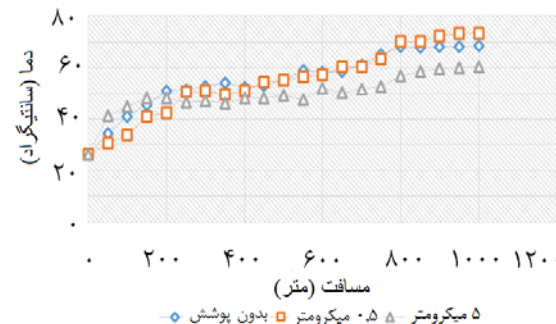
شکل ۲) مدل‌سازی مجموعه سایش مورد استفاده



نمودار ۱۱) مقادیر مربوط به دماهای به‌دست‌آمده از آزمایش و شبیه‌سازی تحت بار ۸۰ نیوتون و سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه

بین سطح پین و گیرنده آن، بین سطح پین و دیسک و بین سطح دیسک و گیرنده آن از قید Tie مطابق استفاده شده است. بین

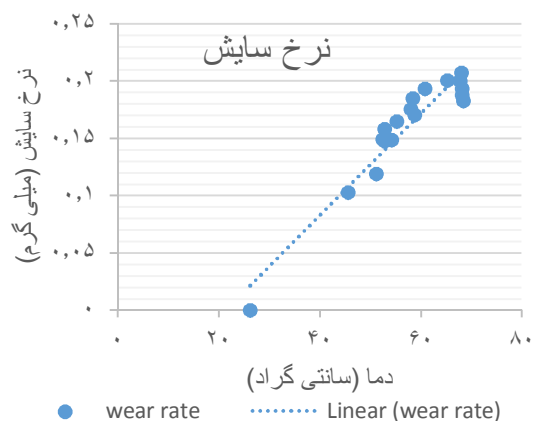
ثابت باقی می‌ماند. دمای پایدار در مرحله ۲ یا شیب دما در مرحله ۱ به‌طور مستقیم متناسب با اتلاف انرژی است. اتلاف انرژی بیشتر، شیب اولیه بیشتر (مرحله اول) و درجه حرارت حالت پایدار بیشتر را منجر می‌شود. تمامی آزمایش‌ها تا زمان دست‌یافتن به حالت پایا (دمای میانگین پایا) در حال اجرا بوده‌اند و سپس به مدت ۳۰ دقیقه نیز ادامه یافته‌اند. همان‌طور که در نمودار ۹ مشخص است میزان دما در هر سه نمونه افزایش پیدا کرده است و نمونه ۵ میکرون دمای کمتری را در تمامی حالات دارد. این درجه حرارت توسط دوربین حرارتی اندازه‌گیری شده است.



نمودار ۹) درجه حرارت اندازه‌گیری‌شده در محل نزدیک به سطح تماس اندازه‌گیری‌شده تحت بار ۸۰ نیوتون و سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه

۳- بحث و بررسی نتایج

نمودار ۱۰ که با استفاده از داده‌های تجربی رسم شده است، نشان می‌دهد که نرخ سایش به‌صورت خطی وابسته به درجه حرارت حالت پایدار سطح تماس است و ارتباط قوی بین نرخ سایش و درجه حرارت حالت پایدار در سطح تماس یک روش نویدبخش برای توصیف سیستم تریبولوژیکی را پیشنهاد می‌کند.



نمودار ۱۰) نمودار نرخ سایش و درجه حرارت نمونه بدون پوشش تحت بار ۸۰ نیوتون و سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه

برای پیش‌بینی مقدار سایش معمولاً از رابطه آرچارد استفاده می‌شود:

$$V = k \frac{Fd}{H} \quad (۱)$$

- the wear of polyoxymethylene in pin-on-disc configuration. *Wear*. 2006;261(11-12):1213-1224.
- 5- Rezaei A, Van Paeppegem W, De Baets P, Ost W, Degrieck J. Adaptive finite element simulation of wear evolution in radial sliding bearings. *Wear*. 2012;296(1-2):660-671.
- 6- Hegadekatte V, Huber N, Kraft O. Finite element based simulation of dry sliding wear. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2005;13(1):57-75.
- 7- Hegadekatte V, Huber N, Kraft O. Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer. *Tribology Letters*. 2006;24(1):51-60.
- 8- Hegadekatte V, Huber N, Kraft O. Development of a simulation tool for wear in microsystems. In: Löhe D, Hausselt J. *Microengineering of metals and ceramics*, Part I. 3rd Volume. Weinheim: Wiley-VCH; 2005.
- 9- Lovell MR, Khonsari MM, Marangoni RD. A finite element analysis of the frictional forces between a cylindrical bearing element and MoS₂ coated and uncoated surfaces. *Wear*. 1999;194(1-2):60-70.
- 10- De Pellegrin DV, Stachowiak GW. Assessing the role of particle shape and scale in abrasion using 'sharpness analysis': Part I. Technique development. *Wear*. 2002;253(9-10):1016-1025.
- 11- De Pellegrin DV, Stachowiak GW. Simulation of three-dimensional abrasive Particles. *Wear*. 2005;258(1-4):208-216.
- 12- Woldman M, Ven Der Heide E, Tinga T, Masen MA. A finite element approach to modeling abrasive wear modes. *Tribology Transaction*. 2017;60(4):711-718.
- 13- Hegadekatte V, Kurzenhäuser S, Huber N, Kraft O. A predictive modeling scheme for wear in tribometers. *Tribology International*. 2008;41(11):1020-1031.
- 14- Ghatrehsamani S, Akbarzadeh S. Predicting the wear coefficient and friction coefficient in dry point contact using continuum damage mechanics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2018;233(3):447-455.
- 15- Martínez FJ, Canales M, Izquierdo S, Jiménez MA, Martínez MA. Finite element implementation and validation of wear modelling in sliding polymer-metal contacts. *Wear*. 2012;284-285:52-64.
- 16- Bortoleto EM, Rovani AC, Seriacopi V, Profito FJ, Zachariadis DC, Machado IF, et al. Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test. *Wear*. 2013;301(1-2):19-26.
- 17- Gerbig YB, Ahmed SU, Chetwynd DG, Haefke H. Topography-related effects on the lubrication of nanostructured hard surfaces. *Tribology International*. 2006;39(9):945-952.
- 18- Iglesias P, Bermudez MD, Moscoso W, Rao BC, Shankar MR, Chandrasekar S. Friction and wear of nanostructured metals created by large strain extrusion machining. *Wear*. 2007;263(1-6):636-642.
- 19- Amiri M, Khonsari MM, Brahmeshwarkar S. On the relationship between wear and thermal response in sliding systems. *Tribology Letters*. 2010;38(2):147-154.
- 20- Amiri M, Khonsari MM, Brahmeshwarkar S. An application of dimensional analysis to entropy-wear relationship. *Journal of Tribology*. 2012;134(1):011604.
- 21- Tavoosi H, Ziaei-Rad S, Karimzadeh F, Akbarzadeh S. Experimental and finite element simulation of wear in nanostructured NiAl coating. *Journal of Tribology*. 2015;137(1):041601.

سطوح آزاد و هوا هم اثر انتقال حرارت همرفت در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال همرفت سطوح آزاد با هوا ۱۰ وات بر متر مربع بر کلین در نظر گرفته شده است. زمان شبیه‌سازی با توجه به آزمون‌های تجربی، ۵۳۰۰ ثانیه انتخاب شده است. دمای اولیه قطعه و محیط با توجه به دمای آزمایش تجربی ۲۵ درجه سانتی‌گراد انتخاب شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود، هر سه مقدار با تقریب خوبی به یکدیگر نزدیک هستند و تنها در شروع اختلاف دماها با نتایج شبیه‌سازی کمی اختلاف بیشتری دارد و پس از آن با خطایی کمتر مقادیر دمایی در حالت سه‌بعدی وجود دارند. نمودار ۱۱ نیز این ادعا را روی نمودارهای مقایسه‌ای نمایش می‌دهد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مقاله حاضر به بررسی پوشش‌های نانوساختار و بررسی سایش پرداخته است. این پژوهش در دو قسمت تئوری و تجربی انجام شده است. در قسمت تجربی نمونه‌هایی با پوشش‌های مختلف مورد ارزیابی سایش و اصطکاک قرار گرفت و مشاهده شد که بین دمای سطح و میزان سایش یک ارتباط خطی وجود دارد.

با استفاده از ضریب اصطکاک و مقادیر نیرو، سرعت، شعاع و انرژی تلف‌شده اصطکاکی محاسبه شد که دمای سطح با استفاده از تحلیل امان محدود استخراج شد و با دماهای حاصل از تست‌های تجربی مقایسه شد. مشاهده می‌شود استفاده کردن از این پوشش می‌تواند تا ۸۰٪ میزان سایش را کاهش دهد. همچنین تحت شرایط کاری مشابه، این پوشش تا حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد مانع از افزایش دمای سطح می‌شود. همچنین استفاده از این پوشش روی سطوح باعث کاهش دوره گذار سایش تا حدود ۲۰٪ می‌شود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تعارض منافع: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

سهم نویسندگان: علی نیکویی‌منش (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۷۰٪)؛ صالح اکبرزاده (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۳۰٪)

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

- 1- Rigney DA. Some thoughts on sliding wear. *Wear*. 1992;152(1):187-192.
- 2- Mehdizadeh M, Akbarzadeh A, Shams K, Khonsari MM. Experimental investigation on the effect of operating conditions on the running-in behavior of lubricated elliptical contacts. *Tribology Letters*. 2015;59:6.
- 3- Podra P, Andersson S. Simulating sliding wear with finite element method. *Tribology International*. 1999;32(2):71-81.
- 4- Benabdallah H, Olender D. Finite element simulation of