# TRIBO-PERFORMANCE STUDIES OF TEXTURED CONCENTRATED CONTACTS AT HEAVY LOADS USING NANO-LUBRICANTS

**RAMESHWAR CHAUDHARY**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**NEW DELHI-110016, INDIA**

**JANUARY 2023**

# TRIBO-PERFORMANCE STUDIES OF TEXTURED CONCENTRATED CONTACTS AT HEAVY LOADS USING NANO-LUBRICANTS

by


**RAMESHWAR CHAUDHARY**

Department of Mechanical Engineering


A thesis
Submitted in fulfilment of the
Requirements for the award of the degree

of

**Doctor of Philosophy**


**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**NEW DELHI-110016, INDIA**


**JANUARY 2023**

**Dedicated to**

*My **parents**, my wife **Anpurna**, and my sons **Bhavya** & **Rudra***

# Certificate

This is to certify that the thesis entitled "**Tribo-performance Studies of Textured Concentrated Contacts at Heavy Loads using Nano-lubricants**" is being submitted by **Mr Rameshwar Chaudhary** to the **Indian Institute of Technology Delhi**, New Delhi, India, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a record of bonafide research work carried out by him under our guidance and supervision. The candidate has fulfilled the requirements for the submission of this research work for his doctoral thesis. In our opinion, this thesis has attained the standard needed for awarding a PhD degree from this institute. As per our awareness, the results in this thesis have not been submitted in part or in full to any other university or institute for awarding any degree or diploma.

Prof. R. K. Pandey
(Supervisor)
Professor
Department of Mechanical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi – 110 016, India

Dr S.K. Mazumdar
(Supervisor)
Formerly Executive Director,
Research & Development Centre,
Indian Oil Corporations Ltd,
Faridabad-121007, India

**Date**: 19.01.2023
**Place**: IIT Delhi, New Delhi

# Acknowledgements

I wish to express my deep gratitude and indebtedness to my thesis supervisors, **Prof. R. K. Pandey, and Dr S.K. Mazumdar**, for their constant support, inspiration, and encouragement during this work. Their comments and suggestions at various stages have immensely improved my understanding of the subject and underlining mechanism, as reported in this thesis. I am fortunate to have worked under their guidance which instilled research ability in me.

I acknowledge all support provided by Prof. S.K. Saha (formerly Head, Department of Mechanical Engineering) in the completion of this thesis. I am highly thankful to **Prof. S.P. Singh** (SRC chairman) and **Prof. S.K. Sinha** (Internal expert in SRC), Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, for their valuable suggestions and feedback during various presentations. I express my sincere gratitude to **Prof. Deepak Kumar** (External expert in SRC), Centre for Automotive Research and Tribology (CART), Centre Indian Institute of Technology Delhi, for their kind help throughout this endeavor. Also, I would like to acknowledge the timely help of all the faculty members of the Department of Mechanical Engineering.

I express my gratitude to the management of the R&D Centre of Indian Oil Corporation, for providing me with this opportunity of pursuing my ambition as a part-time candidate and for sparing me the research facilities for the conduct of the project. I thank all my colleagues at Tribology Department in general for  their efforts in helping me with the conduct of the experiments and to Mr Shankar Bhadhavath, Mr Samuel Pappy, Dr Mukesh Dubey, Mr Rahul B. Meshram, Mr Kailash Nath Yadav, Mr Saurabh Mishra, Mr Suman Das, Mr Sandeep Singh, Mr Shubham Saini, and Mr Jaspal Singh Rait for their kind interactions and help whenever needed. Special thanks to my senior colleagues, Mr Ajay Kumar Harinarain and Mr Rajendra Mahapatra, for engaging me in fruitful discussions on my research work and encouraging me throughout the work. I wish to express my sincere gratitude to my senior colleague. I also express my appreciation Thanks to Mr Lekhraj, Mr Babloo, Mr Arjun, and Mr Karan Singh for their assistance in some of the sample and machine preparation for experiments. I had been virtually dependent on my beloved friends cum colleagues Dr Niharika Gupta, Dr Shipra Agarwal, Dr Vivek Bhardwaj, Dr Jeewan Atwal, Dr Pranbesh Ganai, Mr Ashok Kumar, Dr Faizal Rehmani, Dr Vinay Saini, and Mr Manas Pattnayak from IIT Delhi.

I also take this opportunity to record my sincere thanks to the colleagues of the Metal Working Oil department and Industrial lubricant department, Dr N. Sivasurian, Dr Simmi Datta, Dr Chanakya Tripathi, Dr S. Kannan, Mr L.M. Pandey, and Mr S.B. Kumhar. They took up small tasks associated with this research work as their own and helped me wholeheartedly. My special and sincere thanks to Dr Samik Hait, Dr Jyotiranjan Otta, Dr Mukesh Vyas, and Dr Om Prakash for their technical suggestions and for providing the machines and materials required during the research work. I recall the help rendered by Dr Naveen Pokhriyal, Dr Virender Kumar and Dr Manohar Vinapalli during the experiment related to greases. My special and sincere thanks to Dr C. Kannan, Dr Sova Bhattacharya, Mr Madan Gopal, and Dr S.P. Singh for their help in carrying out SEM analysis throughout this research. I recall the help rendered by Dr J. Cristopher, Dr Rashmi Bagai, and Dr Amardeep Singh while the surface characterization experiments. I am also thankful to Dr Sarita Seth, Dr S. Prahraj, Dr R. Ramanathan, and Dr Ratandeep Joshi for their interactions and continuous help during the research.

At this moment in my life, I will fail in my duty if I don't recollect the passion and urge cultivated by my parents, Shri Norsingh and Smt. Dhrupati Choudhary for pursuing a technical research career. No amount of words can thank their selfless efforts. My wife Annu and my two kids sons, Bhavya and Rudra, have been instrumental in motivating me to accomplish my targets. In the process, they have made many sacrifices of their expectations of me as a husband and father and relieved me of my responsibilities towards the family. I acknowledge their most important contribution at this joyous moment. Last but not the least, I thank one and all who have directly or indirectly contributed to my pursuit.

Date: 19.01.2023 (**Rameshwar Chaudhary**)

# Abstract

There is a growing demand for energy-efficient and high-power density concentrated contacts for hard-working machines and mechanical systems. Therefore, the concentrated contacts found in the machine elements, such as rolling bearings, gears, cam-followers, tractive drives etc., are expected to work efficiently in elevated/severe operating conditions. Since the last couple of decades, several techniques, i.e., surface heat treatments, hard coatings, use of additives in lubricant, nano-lubricants, surface polishing, new materials etc., are being employed by researchers/engineers time-to-time to enhance the tribo-performance behaviours of lubricated concentrated line/point contacts. Recently, surface texture has emerged as a viable technology employing which investigators are exploring to improve the tribo-dynamic performance behaviours of the concentrated contacts. Moreover, it is worth noting here that since the researchers are also making recent past attempts to use nano-lubricants to explore and address the concerns related to starved lubrication. Nano-additives involving CuO, carbon nanotubes, graphene oxides, boron nitrides, metal oxides, PTFE and metal sulfide particles etc., have been widely employed in the explorations for improving the tribo-performance behaviours. It is mainly observed that the roles of surface textures have been experimentally studied for the performance behaviours of lubricated line/point contacts at low to medium loads (characterized by Hertzian pressure varying in the range of 0.2-1.5 GPa) and rolling/sliding speeds (0.02 to 1 m/s) under the reciprocating and unidirectional motions. Therefore, the objectives of this research work have been set to explore to reduce the friction and wear and to increase the lubricating film formation behaviours at the textured line and points contacts operating at a wide range of loads ($P_H$ = 0.20 to 3.5 GPa) under reciprocating (0.2-0.4 m/s) and unidirectional speeds (up to 3 m/s) using nano oils and greases.

The tribo-performance behaviours of lubricated textured point contacts have been explored at relatively high contact loads (up to 3 GPa) under reciprocating motion (0.2 and 0.4 m/s) employing low ($\nu_{@40^0C}$ =100 cSt) and high ($\nu_{@40^0C}$ = 422 cSt) viscous oils as well as $MoS_2$ and PTFE nano oils. In this experimental study, two contacts (flat conventional surface vs. polished ball and textured flat surface vs. polished ball surface) have been created to investigate friction, wear, and contact potential (the ability for film formation). In the presence of texture at the concentrated contacts, the coefficient of friction and wear has reduced considerably with high viscous oil, irrespective of operating parameters. However, low viscous oil has increased wear under identical operating parameters. The contact potential (an indirect indication of film formation during the running-in period) in the texture's presence develops rapidly compared to the conventional surface with both oils. It has demonstrated a reduction in the running-in period in the presence of textures at the contacts. Moreover, better tribological performances have been achieved with PTFE nano oil compared to $MoS_2$ nano oil. Tribo-performance evaluations of reciprocating lubricated concentrated line contacts have also been presented herein, employing the synergistic presence of surface texture and $MoS_2$ and PTFE nano oils. Substantial reductions in friction coefficient (up to 48%) and specific wear rate (of worn rollers) have been found in the combined texture and nano oils at the concentrated line contacts. Moreover, a significant increase in the contact potential (an indication of film formation ability) has also been noticed in the presence of texture and base oils.

Tribo-behaviours of grease lubricated textured point contacts were experimentally explored at heavy loads (characterized in terms of Hertzian pressure, $P_H$=1.5-3.0 GPa) and relatively low sliding speeds (0.2 and 0.4 m/s) under the linear reciprocating motion employing lithium based low and high consistency greases as well as $MoS_2$ and PTFE nano greases. Using a controlled stress rheometer, the effects of grease consistency on the greases' rheological behaviours have also been found at two temperatures, 25°C and 80°C. Overall, textured concentrated contacts yielded a low coefficient of friction (reduction of up to 24.6%), reduced specific wear rate of the ball (decrease of up to 89.5%) and better development of contact potential compared to conventional contacts. The transmission electron microscopy (TEM) of used greases collected from textured contacts revealed less degradation in soap fibres. Moreover, the X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) revealed the formation of ferric oxide ($Fe_2O_3$) and ferrous-ferric oxide ($Fe_3O_4$) protective chemical films on the worn surfaces of balls of the conventional and textured contacts. However, it is also found that friction coefficient and specific wear rate of worn balls reduced considerably in the presence of texture and nanoparticle ($MoS_2$ and PTFE) blended greases at the concentrated contacts irrespective of operating parameters. The coefficient of friction reduced up to 31% at concentrated textured contact lubricated with $MoS_2$ nano grease. Moreover, it reduces up to 30% when lubricated with PTFE nano grease. The specific wear rate of worn balls of concentrated textured contact was reduced to 94% with $MoS_2$ nano grease and 96% with PTFE nano grease.

The effect of $MoS_2$ and PTFE nano oil ($MoS_2$ and PTFE nanoparticle blended in oil) on the tribo-behaviours of textured point contacts have been explored at moderate loads ($P_H$=0.5 and 0.8 GPa) in different lubrication regimes. Two contact configurations (grounded disc vs ball and textured disc vs ball) have been employed to experimentally investigate the friction and wear under boundary, mixed and elastohydrodynamic lubrication regimes. A femtosecond pulsed laser has been used to create the surface texture (dimples) of two sizes and dimple area densities. It is found that friction coefficient and wears tracks' width are reduced due to the combined effect of texture and nano lubricating oil at the concentrated point contact irrespective of operating parameters. The textured concentrated point contact lubricated with $MoS_2$ and PTFE nano oil yielded a lower friction coefficient than conventional contact in both boundary and mixed boundary regimes. Moreover, the reduction in friction coefficient was observed more in the boundary regime than in the mixed regime due to the acting of dimples as lubricant reservoirs. The optical images of worn balls and discs, EDS of the worn textured surface and AFM images have been presented to describe the associated mechanism.

**********

# सार

कड़ी मेहनत करने वाली मशीनों और यांत्रिक प्रणालियों के लिए ऊर्जा-कुशल और उच्च-शक्ति घनत्व केंद्रित संपर्कों की मांग बढ़ रही है। इसलिए, मशीन के तत्वों में पाए जाने वाले केंद्रित संपर्क, जैसे कि रोलिंग बियरिंग्स, गियर्स, कैम-फॉलोअर्स, ट्रैक्टिव ड्राइव आदि, से उच्च/गंभीर परिचालन स्थितियों में कुशलता से काम करने की उम्मीद की जाती है। पिछले कुछ दशकों से, कई तकनीकों, जैसे, सतही गर्मी उपचार, कठोर कोटिंग्स, स्नेहक में एडिटिव्स का उपयोग, नैनो-लुब्रिकेंट्स, सतह पॉलिशिंग, नई सामग्री आदि, समय-समय पर शोधकर्ताओं/इंजीनियरों द्वारा नियोजित किए जा रहे हैं। लुब्रिकेटेड कंसंट्रेट लाइन/पॉइंट कॉन्टैक्ट्स के ट्राइबो-परफॉर्मेंस बिहेवियर को बढ़ाएं। हाल ही में, सतह की बनावट एक व्यवहार्य तकनीक के रूप में उभरी है, जिसका उपयोग जांचकर्ता केंद्रित संपर्कों के ट्राइबो-डायनामिक प्रदर्शन व्यवहार को बेहतर बनाने के लिए कर रहे हैं। इसके अलावा, यहां यह ध्यान देने योग्य है कि शोधकर्ता हाल के दिनों में भूखे स्नेहन से संबंधित चिंताओं का पता लगाने और उन्हें संबोधित करने के लिए नैनो-स्नेहक का उपयोग करने के प्रयास कर रहे हैं। नैनो-एडिटिव्स जिनमें CuO, कार्बन नैनोट्यूब, ग्राफीन ऑक्साइड, बोरॉन नाइट्राइड, मेटल ऑक्साइड, PTFE और मेटल सल्फाइड कण आदि शामिल हैं, को व्यापक रूप से ट्राइबो-प्रदर्शन व्यवहार में सुधार के लिए अन्वेषण में नियोजित किया गया है। यह मुख्य रूप से देखा गया है कि सतह की बनावट की भूमिकाओं का प्रयोगात्मक रूप से निम्न से मध्यम भार ($P_H$ = 0.2-1.5 GPa की सीमा में भिन्न) और रोलिंग / स्लाइडिंग गति पर चिकनाई लाइन / बिंदु संपर्कों के प्रदर्शन व्यवहार के लिए किया गया है (0.02 से 1 m/s) पारस्परिक और एकदिश गति के तहत। इसलिए, इस शोध कार्य के उद्देश्यों को घर्षण और पहनने को कम करने और टेक्सचर्ड लाइन पर लुब्रिकेटिंग फिल्म निर्माण व्यवहार को बढ़ाने के लिए निर्धारित किया गया है और लोड की एक विस्तृत श्रृंखला ($P_H$ = 0.20 से 3.5 GPa) पर काम कर रहे संपर्कों को इंगित करता है। नैनो-ऑयल और ग्रीस का उपयोग करते हुए पारस्परिक (0.2-0.4 m/s) और यूनिडायरेक्शनल गति (3 m/s तक)।

लुब्रिकेटेड टेक्सचर पॉइंट कॉन्टैक्ट्स के ट्राइबो-परफॉर्मेंस बिहेवियर को रिसीप्रोकेटिंग मोशन (0.2 और 0.4 m/s) के तहत कम (@40°C = 100 cSt) और हाई के तहत अपेक्षाकृत उच्च कॉन्टैक्ट लोड (3 GPa तक) पर खोजा गया है। (40°C = 422 cSt) चिपचिपा तेल और साथ ही $MoS_2$ और PTFE नैनो-तेल। इस प्रायोगिक अध्ययन में, घर्षण,

पहनने और संपर्क क्षमता (फिल्म निर्माण की क्षमता) की जांच के लिए दो संपर्क (सपाट पारंपरिक सतह बनाम पॉलिश की गई गेंद और बनावट वाली सपाट सतह बनाम पॉलिश की गई गेंद की सतह) बनाए गए हैं। संकेंद्रित संपर्कों पर बनावट की उपस्थिति में, उच्च चिपचिपा तेल के साथ घर्षण और पहनने का गुणांक काफी कम हो गया है, परिचालन मापदंडों के बावजूद। हालांकि, कम चिपचिपा तेल ने समान ऑपरेटिंग मापदंडों के तहत पहनने में वृद्धि की है। बनावट की उपस्थिति में संपर्क क्षमता (रनिंग-इन अवधि के दौरान फिल्म निर्माण का एक अप्रत्यक्ष संकेत) दोनों तेलों के साथ पारंपरिक सतह की तुलना में तेजी से विकसित होती है। इसने संपर्कों में बनावट की उपस्थिति में चलने की अवधि में कमी का प्रदर्शन किया है। इसके अलावा, $MoS_2$ नैनो-तेल की तुलना में PTFE नैनो-तेल के साथ बेहतर जनजातीय प्रदर्शन हासिल किया गया है। सतही बनावट और $MoS_2$ और PTFE नैनो तेलों की सहक्रियात्मक उपस्थिति को नियोजित करते हुए, पारस्परिक स्नेहक केंद्रित लाइन संपर्कों के ट्राइबो-प्रदर्शन मूल्यांकन भी यहां प्रस्तुत किए गए हैं। केंद्रित लाइन संपर्कों पर बनावट और नैनो-तेल की संयुक्त उपस्थिति में घर्षण गुणांक (48% तक) और विशिष्ट पहनने की दर (पहने रोलर्स) में पर्याप्त कमी पाई गई है। इसके अलावा, बनावट और बेस ऑयल की उपस्थिति में संपर्क क्षमता (फिल्म निर्माण क्षमता का एक संकेत) में उल्लेखनीय वृद्धि भी देखी गई है।

भारी भार (हर्ट्ज़ियन दबाव, $P_H$ = 1.5-3.0 GPa के संदर्भ में विशेषता) और लिथियम को नियोजित करने वाली रैखिक पारस्परिक गति के तहत अपेक्षाकृत कम स्लाइडिंग गति (0.2 और 0.4 m/s) पर ग्रीस स्नेहक बनावट बिंदु संपर्कों के ट्राइबो-व्यवहारों का प्रयोगात्मक रूप से पता लगाया गया था। आधारित कम और उच्च स्थिरता ग्रीस के साथ-साथ MoS2 और PTFE नैनो ग्रीस। नियंत्रित स्ट्रेस रियोमीटर का उपयोग करते हुए, ग्रीस के रियोलॉजिकल व्यवहार पर ग्रीस की स्थिरता का प्रभाव भी दो तापमानों, 25 डिग्री सेल्सियस और 80 डिग्री सेल्सियस पर पाया गया है। कुल मिलाकर, बनावट वाले संकेंद्रित संपर्कों में घर्षण का कम गुणांक (24.6% तक की कमी), गेंद की विशिष्ट पहनने की दर (89.5% तक की कमी) और पारंपरिक संपर्कों की तुलना में संपर्क क्षमता का बेहतर विकास हुआ। बनावट वाले संपर्कों से एकत्र किए गए प्रयुक्त ग्रीस के ट्रांसमिशन इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (टीईएम) ने साबुन के रेशों में कम गिरावट का खुलासा किया। इसके अलावा, एक्स-रे फोटोइलेक्ट्रॉन स्पेक्ट्रोस्कोपी (XPS) ने पारंपरिक और बनावट वाले संपर्कों की गेंदों की घिसी हुई सतहों पर फेरिक ऑक्साइड ($Fe_2O_3$) और फेरस-फेरिक ऑक्साइड

($Fe_3O_4$) सुरक्षात्मक रासायनिक फिल्मों के गठन का खुलासा किया। हालांकि, यह भी पाया गया है कि घर्षण गुणांक और घिसी हुई गेंदों की विशिष्ट पहनने की दर बनावट और नैनोपार्टिकल ($MoS_2$ और PTFE) मिश्रित ग्रीस की उपस्थिति में काफी कम हो जाती है, जो परिचालन मापदंडों के बावजूद केंद्रित संपर्कों पर होती है। $MoS_2$ नैनो ग्रीस से लुब्रिकेटेड टेक्सचर्ड कॉन्संट्रेटेड कॉन्टैक्ट पर घर्षण का गुणांक 31% तक कम हो गया। इसके अलावा, PTFE नैनो ग्रीस के साथ चिकनाई करने पर यह 30% तक कम हो जाता है। केंद्रित बनावट वाले संपर्क की घिसी हुई गेंदों की विशिष्ट पहनने की दर को $MoS_2$ नैनो ग्रीस के साथ 94% तक और PTFE नैनो ग्रीस के साथ 96% तक कम किया गया था।

$MoS_2$ और PTFE नैनो तेल ($MoS_2$ और PTFE नैनोपार्टिकल मिश्रित तेल) के बनावट बिंदु संपर्कों के ट्राइबो-व्यवहार पर विभिन्न स्नेहन व्यवस्थाओं में मध्यम भार ($P_H$ = 0.5 और 0.8 GPa) पर पता लगाया गया है। दो प्रकार के संपर्क विन्यास (ग्राउंडेड डिस्क बनाम बॉल और टेक्सचर्ड डिस्क बनाम बॉल) को प्रयोगात्मक रूप से घर्षण की जांच करने और सीमा, मिश्रित और इलास्टोहाइड्रोडायनामिक स्नेहन व्यवस्था के तहत पहनने के लिए नियोजित किया गया है। दो आकारों और डिंपल क्षेत्र घनत्व की सतह बनावट (डिम्पल) बनाने के लिए एक फेमटोसेकंड स्पंदित लेजर का उपयोग किया गया है। यह पाया गया है कि घर्षण गुणांक और वियर ट्रैक्स की चौड़ाई कम हो जाती है, क्योंकि बनावट और नैनो स्नेहक तेल के संयुक्त प्रभाव के कारण केंद्रित बिंदु संपर्क पर परिचालन मापदंडों के बावजूद कम हो जाता है। $MoS_2$ और PTFE नैनो तेल के साथ चिकनाई वाले बनावट वाले केंद्रित बिंदु संपर्क ने सीमा और मिश्रित सीमा व्यवस्था दोनों में पारंपरिक संपर्क की तुलना में कम घर्षण गुणांक प्राप्त किया। इसके अलावा, घर्षण गुणांक में कमी मिश्रित शासन की तुलना में सीमा शासन में स्नेहक जलाशयों के रूप में डिंपल के अभिनय के कारण अधिक देखी गई थी। संबंधित तंत्र का वर्णन करने के लिए घिसी हुई गेंदों और डिस्क की ऑप्टिकल छवियां, घिसी हुई बनावट वाली सतह के ईडीएस और एएफएम छवियों को प्रस्तुत किया गया है।

*********

# Contents

**5.PART-B**

# List of Figures

# List of Tables

# Nomenclature

| | |
|---|---|
| $f$ | Frequency,Hz |
| $F$ | Friction force, N |
| $P_H$ | Hertzian pressure, GPa |
| $R_a$ | Average roughness, µm |
| $R_q$ | Root mean square (rms) roughness, µm |
| $s$ | Stroke, mm |
| $T$ | Temperature, ˚C |
| $U_s$ | Sliding speed, m/s |
| $\eta$ | Viscosity of lubricant, Pa-s |
| $\upsilon$ | Kinematic viscosity, $mm^2/s$ |
| $\rho$ | Lubricant density, $kg/m^3$ |
| $\mu$ | Coefficient of friction |
| $d$ | Wear scar diameter, mm |
| $F$ | Friction force, N |
| $h_{min}$ | Minimum film thickness, m |