TRIBOLOGICAL AND VIBRATIONAL STUDIES OF TEXTURED SPUR GEARS

NIHARIKA GUPTA

CENTRE FOR AUTOMOTIVE RESEARCH AND TRIBOLOGY (Formerly ITMMEC)

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

NEW DELHI-110016, INDIA

DECEMBER 2021

TRIBOLOGICAL AND VIBRATIONAL STUDIES OF TEXTURED SPUR GEARS

By

NIHARIKA GUPTA

Centre for Automotive Research and Tribology
(Formerly ITMMEC)

Submitted
in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

DECEMBER 2021

Certificate

This is to certify that the thesis entitled "**Tribological and Vibrational Studies of Textured Spur Gears"** being submitted by **Ms. Niharika Gupta** (2015ITZ8141) to the **Indian Institute of Technology Delhi**, New Delhi, India, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a bonafide record of original research work carried out by her under our supervisions in conformity with rules and regulations of the institute.

The results contained in this thesis have not been submitted, in part or in full, to any other university or institute for award of any degree or diploma.

Dr. N. Tandon
Emeritus Professor
Centre for Automotive Research and Tribology (CART)
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi-110016, India

Dr. R.K. Pandey
Professor
Department of Mechanical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi-110016, India

Date: 22-12-2021
Place: New Delhi

Dedicated to my

Husband

who have always been my source of inspiration, guidance and encouragement, and my gratitude for whom can never be put into words

Acknowledgement

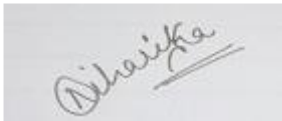
All praise and thanks to the **Almighty Lord** for providing me with the strength, determination, patience and all the blessings which made this work feasible. I would like to express my deep and sincere gratitude to my thesis supervisors, **Prof. N. Tandon** and **Prof. R. K. Pandey**, for their invaluable guidance, constant support, encouragement, and inspiration during the entire course of this endeavour. Their comments and suggestions at various stages have immensely improved my concept and understanding of the subject and paved the way from time to time for solutions of experimental and theoretical studies reported in this thesis.

I acknowledge all the support provided by **Prof. B. K. Panigrahi** (Head, Centre for Automotive Research and Tribology) in completion of this thesis. I am highly thankful to **Prof. J. K. Dutt** (External expert in SRC), Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, for his valuable suggestions and essential feedbacks during my presentations. I express my sincere gratitude to internal SRC members **Prof. V. K. Agarwal** and **Dr. Deepak Kumar** for their kind technical suggestions and help time to time. I would like to acknowledge the help provided by **Prof. J. Bijwe** and **Dr. S. Fatima**, faculty members of CART, IIT Delhi during pursue of this study. I would also like to thank **Dr. Dinesh Kalyanasundaram** for providing the laser machine facility available in the Laboratory for Fabrication of Biomedical Devices (Centre for Biomedical Engineering, IIT Delhi) for surface texturing.

Constant help rendered by **Mr. Ashok Kumar** and **Mr. Avatar Singh** in Machine Dynamics Laboratory (CART) during my experimental studies is gratefully acknowledged. I would also like to thankfully record the necessary help extended by other staff members of the centre. I must mention and record my special and heartfelt thanks to my seniors and co-researchers **Dr. Swati Gautam, Dr. Vivek Bhardwaj, Dr. Surojit Poddar, Dr. Manish Raj,**

Dr. Harprabhjyot Singh, at CART, **Mr. Jeewan Atwal, Mr. Manas Ranjan Pattnaik** at Mechanical Engineering and **Mr. K. E. Ch. Vidyasagar** at Centre for Biomedical Engineering for their company, moral, academic interaction and all their support during pursue of this endeavour.

I express my deep-felt love and gratitude to my parents and in-laws, especially my husband **(Mr. Divy Mithal)** and son **(Kalp Mithal),** and all nears and dears for having patiently put up with me and constantly encouraging me throughout this endeavour at the cost of their own sufferings.



(Niharika Gupta)

Date: 22/12/2021

Place: New Delhi

Abstract

Gearsets play vital role in the transmission systems of industrial machines and vehicles (buses, trucks, earth moving machinery, loco-engines, cars, marine engines etc.). Therefore, there is increasing demand for hard and efficient working gearsets possessing very high gear transmission density and long life for use in several mechanical systems. In this situation, the improvement in the tribological performance at the gear teeth interfaces is needed for preventing the surface failures and controlling the vibration. Elastohydrodynamic, mixed or boundary lubrication regimes occur between the contact of the mating teeth surfaces of gearsets due to its high non-conformity. This increases friction at the teeth contacts. Thus, the existence of effective lubricating film at the gear teeth interfaces is necessary to avoid the gearsets operation under mixed/boundary lubrication regime or starved lubrication at elevated loads and slow speeds. It is worth noting here that since recent past, the tribological performance in gearsets operating in boundary lubrication regime is being improved by employing nano-lubricants, extreme pressure additives and increase in teeth surface hardness and surface finish. It is widely reported by the researchers that the improvement in tribological behaviour at gear teeth interfaces leads to reduced dynamic problems and increased life/reliability of gear transmission systems.

After the emergence of surface textures as technology, the researchers are exploring to improve the tribological and vibration behaviours of conformal and non-conformal contacts using different surface textures. These studies have shown significant reductions in the friction and vibration. However, careful selection of various texture parameters such as texture density, depth, dimensions, and texturing methods are extremely important to achieve the significant

improvement in tribodynamic performance of tribological elements. Therefore, the objective of this research work is to explore the tribodynamic behaviours of textured teethed gearsets experimentally and numerically for enhancing the performance parameters in comparison to conventional teethed gearsets operating at the same parameters under fully flooded/starved lubricating conditions.

The tribological and vibrational behaviors of conventional and textured spur gearsets have been experimentally explored under fully flooded and starved lubricating conditions at different operating parameters. Three different textures on gears' teeth profiles were created by placing the dimples of vertically oriented ellipsoid, horizontally oriented ellipsoid and hemisphere in the zigzag patterns using nanosecond pulsed fiber laser. Tribological parameters (contact resistance, temperature rise and surface topography) and vibration (in time and frequency domains) were obtained, compared, and analysed. The results revealed significant reduction in vibration amplitudes, increase in contact resistance, decrease in temperature rise and less damage of mating surfaces in the presence of textures. Moreover, the texture involving vertically oriented ellipsoidal dimples has yielded the best results. Further, to explore the critical role of texture on the tribodynamics of gearsets, accelerated testing has been done. Experimental investigation of the tribodynamic behaviour of spur gearsets has been done by employing conventional and textured teeth (presence of variable size micro-cylindrical dimples increasing from PCD to tip/root) from comparison perspective. The micro-cylindrical dimples of non-uniform diameters were fabricated using chemical etching on the gears' teeth surface. The vibration results obtained employing conventional and textured gearsets have been compared and analysed in time and frequency domains. Moreover, the surface topography and temperature rise have been measured. Based on the experimental results, it is found that in the presence of texture on gear teeth, the vibration amplitudes, oil film temperature rise and teeth surface damage have substantially reduced.

Furthermore, the synergistic effects of surface texture and Molybdenum disulphide (MoS_2) blended grease have also been explored on the tribodynamic performance of spur gearsets. It was decided to use the texture involving the best performing vertically oriented ellipsoidal dimples, which was explored and established for oil lubricated textured gearsets. The experiments were performed at different applied torques and a pitch line velocity of 4 m/s keeping in mind the practical application of the results. Contact resistance, vibrations, temperature rise and surface topographies have been measured and analysed. Substantial increase in contact resistance and reduction in vibration amplitudes at gear mesh frequency were found in the presence of texture. Reduction in interfacial temperature rise and less damage to teeth surface were also observed.

Numerical investigation on performance behaviour of elastohydrodynamically lubricated concentrated line/teeth contacts of gearset incorporating surface texture have also been done. In the numerical analysis, the Reynolds and elasticity equations have been solved simultaneously and discretized using finite difference method considering cavitation effect. The performance parameters (film thickness, coefficient of friction, side leakage and dynamic coefficients) have been numerically investigated and analysed for varying input data. The results show that the textured line contact having ellipsoidal dimples yields substantial increase in minimum film thickness and reduction in friction coefficient as compared to the conventional contact. The side leakage has also decreased in the presence of surface texture. Overall, the textured contact has shown much better static performance among all the cases. It has also shown better dynamic coefficients in comparison to conventional contacts.

****

सार

गियरसेट औद्योगिक मशीनों और वाहनों (बसों, ट्रकों, धरती पर चलने वाली मशीनरी, लोको-इंजन, कार, समुद्री इंजन आदि) के संचरण प्रणालियों में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। इसलिए कई यांत्रिक प्रणालियों में उपयोग के लिए बहुत अधिक गियर ट्रांसमिशन घनत्व और लंबे जीवन वाले कठोर और कुशल काम करने वाले गियरसेट की मांग बढ़ रही है। इस स्थिति में, सतह की विफलताओं को रोकने और कंपन को नियंत्रित करने के लिए गियर दांत इंटरफेस में जनजातीय प्रदर्शन में सुधार की आवश्यकता है। इलास्टोहाइड्रोडायनामिक, मिश्रित या सीमा स्नेहन व्यवस्था इसकी उच्च गैर-अनुरूपता के कारण गियरसेट के संभोग दांतों की सतहों के संपर्क के बीच होती है। इससे दांतों के संपर्कों में घर्षण बढ़ता है। इस प्रकार, उच्च भार और धीमी गति पर भूखे स्नेहन के अस्तित्व में भी मिश्रित/सीमा स्नेहन व्यवस्था के तहत गियरसेट के संचालन से बचने के लिए गियर दांत इंटरफेस पर प्रभावी स्नेहन फिल्म का अस्तित्व आवश्यक है। यहां यह ध्यान देने योग्य है कि हाल के दिनों से, नैनो-लुब्रिकेंट्स, अत्यधिक दबाव एडिटिव्स को नियोजित करके और दांतों की सतह की कठोरता और सतह की फिनिश में वृद्धि करके सीमा स्नेहन शासन में संचालित गियरसेट में जनजातीय प्रदर्शन में सुधार किया जा रहा है। शोधकर्ताओं द्वारा यह व्यापक रूप से बताया गया है कि गियर दांत इंटरफेस में जनजातीय व्यवहार में सुधार से गतिशील समस्याएं कम हो जाती हैं और गियर ट्रांसमिशन सिस्टम के जीवन/विश्वसनीयता में वृद्धि होती है।

प्रौद्योगिकी के रूप में सतह बनावट के उद्भव के बाद, शोधकर्ता विभिन्न सतह बनावट का उपयोग करके अनुरूप और गैर-अनुरूप संपर्कों के जनजातीय और कंपन व्यवहार में सुधार करने के लिए खोज रहे हैं। इन अध्ययनों ने घर्षण और कंपन में महत्वपूर्ण कमी दिखाई है। हालांकि, विभिन्न बनावट मापदंडों जैसे कि बनावट घनत्व, गहराई, आयाम और बनावट विधियों का सावधानीपूर्वक चयन आदिवासी तत्वों

के ट्राइबोडायनामिक प्रदर्शन में महत्वपूर्ण सुधार प्राप्त करने के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है। इसलिए, इस शोध कार्य का उद्देश्य पारंपरिक दांतेदार गियर जोड़े की तुलना में प्रदर्शन मापदंडों को बढ़ाने के लिए प्रयोगात्मक और संख्यात्मक रूप से बनावट वाले के ट्राइबोडायनामिक व्यवहार का पता लगाना है। पूरी तरह से बाढ़/भूखे स्नेहन स्थितियों के तहत समान पैरामीटर।

पारंपरिक और बनावट वाले स्पर गियर पेयर के ट्राइबोलॉजिकल और वाइब्रेशनल व्यवहारों को विभिन्न ऑपरेटिंग मापदंडों पर पूरी तरह से बाढ़ और भूखे स्नेहक परिस्थितियों में प्रयोगात्मक रूप से खोजा गया है। गियर के दांतों के प्रोफाइल पर तीन अलग-अलग बनावट नैनोसेकंड स्पंदित फाइबर लेजर का उपयोग करके ज़िगज़ैग पैटर्न में लंबवत उन्मुख दीर्घवृत्त, क्षैतिज रूप से उन्मुख दीर्घवृत्त और गोलार्ध के डिम्पल को रखकर बनाए गए थे। जनजातीय पैरामीटर (संपर्क प्रतिरोध, तापमान वृद्धि और सतह स्थलाकृति) और कंपन (समय और आवृत्ति डोमेन में) प्राप्त, तुलना और विश्लेषण किया गया था। परिणामों से कंपन आयामों में उल्लेखनीय कमी, संपर्क प्रतिरोध में वृद्धि, तापमान वृद्धि में कमी और बनावट की उपस्थिति में संभोग सतहों की कम क्षति का पता चला। इसके अलावा, लंबवत उन्मुख दीर्घवृत्तीय डिम्पल से युक्त बनावट ने सर्वोत्तम परिणाम प्राप्त किए हैं। इसके अलावा, गियरसेट के ट्राइबोडायनामिक्स पर बनावट की महत्वपूर्ण भूमिका का पता लगाने के लिए त्वरित परीक्षण किया गया है। तुलनात्मक दृष्टिकोण से पारंपरिक और बनावट वाले दांतों (पीसीडी से टिप/रूट तक बढ़ते हुए चर आकार के सूक्ष्म-बेलनाकार डिम्पल की उपस्थिति) को नियोजित करके स्पर गियरसेट के ट्राइबोडायनामिक व्यवहार की प्रायोगिक जांच की गई है। गैर-समान व्यास के सूक्ष्म-बेलनाकार डिम्पल गियर्स के दांतों की सतह पर रासायनिक नक़्क़ाशी का उपयोग करके गढ़े गए थे। पारंपरिक और बनावट वाले गियरसेट का उपयोग करके प्राप्त कंपन परिणामों की समय और आवृत्ति डोमेन में तुलना और विश्लेषण किया गया है। इसके अलावा, सतह स्थलाकृति और तापमान वृद्धि को मापा गया है। प्रयोगात्मक परिणामों के आधार पर, यह पाया गया है कि गियर दांतों पर बनावट की उपस्थिति में, कंपन आयाम, तेल फिल्म तापमान वृद्धि और दांतों की सतह की क्षति में काफी कमी आई है।

इसके अलावा, सतह बनावट और मोलिब्डेनम डाइसल्फाइड (MoS_2) मिश्रित ग्रीस के सहक्रियात्मक प्रभावों को भी स्पर गियरसेट के ट्राइबोडायनामिक प्रदर्शन पर खोजा गया है। सबसे अच्छा प्रदर्शन करने वाले लंबवत उन्मुख दीर्घवृत्तीय डिम्पल को शामिल करते हुए बनावट का उपयोग करने का निर्णय लिया गया था, जिसे तेल लुब्रिकेटेड बनावट वाले गियरसेट के लिए खोजा और स्थापित किया गया था। प्रयोगों को विभिन्न लागू टोक़ों और परिणामों के व्यावहारिक अनुप्रयोग को ध्यान में रखते हुए 4 मीटर/सेकेंड की पिच लाइन वेग पर किया गया था। संपर्क प्रतिरोध, कंपन, तापमान वृद्धि और सतह स्थलाकृतियों को मापा और विश्लेषण किया गया है। बनावट की उपस्थिति में संपर्क प्रतिरोध में पर्याप्त वृद्धि और गियर मेश आवृत्ति पर कंपन आयामों में कमी पाई गई। इंटरफेशियल तापमान वृद्धि में कमी और दांतों की सतह को कम नुकसान भी देखा गया।

सतह बनावट (एलिप्सोइडल डिम्पल) को शामिल करते हुए गियरसेट के इलास्टोहाइड्रोडायनामिक रूप से लुब्रिकेटेड केंद्रित लाइन/दांत संपर्कों के प्रदर्शन व्यवहार पर संख्यात्मक जांच भी की गई है। संख्यात्मक विश्लेषण में, रेनॉल्ड्स और लोच समीकरणों को एक साथ हल किया गया है और गुहिकायन प्रभाव पर विचार करते हुए परिमित अंतर विधि का उपयोग करके विवेक किया गया है। प्रदर्शन मापदंडों (फिल्म की मोटाई, घर्षण का गुणांक, साइड लीकेज और डायनेमिक गुणांक) को अलग-अलग इनपुट डेटा के लिए संख्यात्मक रूप से जांच और विश्लेषण किया गया है। परिणाम बताते हैं कि दीर्घवृत्ताकार डिम्पल वाले बनावट वाले लाइन संपर्क से पारंपरिक संपर्क की तुलना में न्यूनतम फिल्म मोटाई और घर्षण गुणांक में कमी में पर्याप्त वृद्धि होती है। सतह बनावट की उपस्थिति में साइड रिसाव भी कम हो गया है। कुल मिलाकर, बनावट वाले संपर्क ने सभी मामलों में बेहतर स्थिर प्रदर्शन दिखाया है। इसने पारंपरिक संपर्कों की तुलना में बेहतर गतिशील गुणांक भी दिखाया है।

****

Table of Contents

List of Figures

List of Tables

Nomenclature

a	Half hertzian width, m
β	Bulk modulus, N/m^2
c_p	Specific heat capacity of lubricant, J/kg-K
D	Deformation, m
E'	Reduced modulus of elasticity, Pa
E	Modulus of elasticity, Pa
f	Friction force, N
F	Dimensionless friction force, $f/\frac{E' R_x L}{2}$
g	Switch function
h	Film thickness, m
h_m	Minimum film thickness, m
h_{ell}	Film thickness for ellipsoidal dimple, m
H	Dimensionless film thickness, h/R_x
H_m	Dimensionless minimum film thickness, h/R_x
h_{st}	Minimum film thickness for steady state condition, m
H_{st}	Normalized film thickness for steady state condition, h_{st}/Rx
ΔH	Perturbation parameter-fluid film displacement
$\Delta \dot{H}$	Perturbation parameter-velocity
k	Stiffness, N/m
K	Stiffness coefficient, $\frac{k}{\frac{E' a L}{2 R_x}}$
p	Pressure in lubricating film, Pa

P	Dimensionless pressure in lubricating film, p/E'
P_c	Cavitation pressure, N/m^2
p_H	Hertzian pressure, Pa
p_{st}	Steady state pressure in lubricating film, Pa
P_{st}	Dimensionless steady state pressure in lubricating film, p_{st}/E'
P_H	Dimensionless perturbed pressure for stiffness
$P_{\dot{H}}$	Dimensionless perturbed pressure for damping
R_x	Equivalent radius in x-y plane, m
Rz	Equivalent radius in y-z plane, m
r_x	Ellipsoidal dimple radius in x-direction, m
r_y	Dimple depth, m
r_x	Ellipsoidal dimple radius in z-direction, m
u	Velocity in x-direction, m/s
v	Velocity in y-direction, m/s
w	Velocity in z-direction, m/s
u_1	Velocity of bounding solid-1 in x-direction, m/s
u_2	Velocity of bounding solid-2 in x-direction, m/s
u_{avg}	Average rolling velocity in x direction $((u_1 + u_2)/2)$, m/s
$\bar{u}$	Dimensionless average velocity, $\frac{u_{avg}}{\left(\frac{{R_x}^2 E'}{\eta_0 a}\right)}$
ω	Angular velocity, s^{-1}
W	External applied load, N
w_{int}	Load (achieved by pressure integration in domain), N
W_{int}	Dimensionless load, $\frac{w_{int}}{\frac{E' a L}{2}}$

x	Coordinate axis in rolling direction
X	Dimensionless coordinate in rolling direction, x/a
y	Coordinate axis in film thickness direction
z	Coordinate axis across rolling direction
Z	Dimensionless coordinate across rolling direction, $z/(L/2)$
Z'	Roelands exponent
ΔX	Dimensionless grid spacing in x direction
ΔZ	Dimensionless grid spacing in z direction
α	Pressure viscosity coefficient of lubricant, Pa^{-1}
γ	Thermal expansivity coefficient of lubricant, K^{-1}
ζ	Temperature viscosity coefficient of lubricant, K^{-1}
η	Viscosity of lubricant, Pa-s
η_0	Viscosity of lubricant at ambient temperature, Pa-s
$\bar{\eta}$	Dimensionless viscosity of lubricant, η/η_0
λ	Dimensionless parameter, $\frac{\eta_0 a^2 \omega_p}{{R_x}^2 E'}$
μ	Friction coefficient (F/W_{int})
ρ	Density of lubricant, kg/m^3
ρ_0	Density of lubricant at ambient condition,
$\bar{\rho}$	Dimensionless density of lubricant, ρ/ρ_0
ρ_c	Density within cavitated region
ϕ	Nondimensional density in full film, ρ/ρ_c
	Fractional film content in cavitation region
υ	Poisson's ratio