



HAL
open science

Contacts ElastoHydroDynamiques micro-texturés

François-Pierre Ninove, Denis Mazuyer

► **To cite this version:**

François-Pierre Ninove, Denis Mazuyer. Contacts ElastoHydroDynamiques micro-texturés. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391280

HAL Id: hal-03391280

<https://hal.science/hal-03391280>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contacts EHD micro-texturés en application du contact segment chemise

François-Pierre Ninove*, Denis Mazuyer

Ecole Centrale de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes – UMR CNRS 5513 – 69134 Ecully Cedex, France

Résumé:

La Texturation de Surface par Laser (LST) se révèle une solution prometteuse pour le contrôle du frottement en contact lubrifié. Les mécanismes de lubrification induits par des microcavités réalisées par Laser passant à travers un contact ÉlastoHydroDynamique (EHD) ponctuel sont analysés expérimentalement en mouvement stationnaire et transitoire. Dans des conditions de roulement-glisement, le passage d'une seule microcavité modifie la distribution d'épaisseur du film lubrifiant et la portance. L'analyse du régime transitoire permet de se rapprocher des conditions du contact segment chemise et d'exposer les phénomènes physiques associés.

Abstract:

Laser Surface Texturing (LST) appears as a promising way in any tribological applications to control friction in field of lubricated contact. The lubrication mechanisms induced by LASER made circular micro-cavities passing through an ElastoHydrodynamical Lubricated (EHL) point contact are analysed experimentally in stationary and transient regimes. Under rolling-sliding and in steady-state conditions, the passage of an isolated cavity modifies the film thickness distribution and the hydrodynamic pressure. The transient aspect allows us to be closer to the cylinder liner - piston ring contact and to analyze physical phenomena induced.

Mots clés: Lubrification ;EHD; texturation de surface ; Segment Chemise ;transitoire

1 Introduction

Les politiques de développement durable et de protection de l'environnement poussent les industriels de l'automobile à développer des solutions voire des palliatifs pour limiter l'usure du véhicule et la pollution créée par les véhicules sans dégrader ses performances. Dans le moteur, de nombreux systèmes sont soumis à des sollicitations sévères en termes d'efforts et de températures induisant des sollicitations combinées de glissement alternatif et de lubrification variable présentes au niveau de l'ensemble Segment Piston Chemise (SPC) qui est responsable de 50% de pertes par frottement d'un moteur.

La texturation de surface par laser est depuis quelques années un domaine de recherche très étudié car elle se présente comme une solution prometteuse de réduction du frottement. Historiquement, la texturation de surface appliquée au domaine de la tribologie a démarré avec les travaux de Schneider [1] en 1984 sur les roulements vibratoires où des rainures peu profondes par déformation plastique étaient créées avec un indenteur dur. Au cours de la même période, Suh et al.[2-6] aux USA ont développé des procédés basés sur la modulation de la surface : la suppression des débris d'usure oxydés de l'interface des contacts électriques est réalisé grâce à une méthode d'usinage par abrasion qui permet la création de rainures sur la surface appelée surface ondulée. Beaucoup de travaux expérimentaux ont montré des gains en frottement et/ou en durée de vie (usure) avec une surface texturée pour diverses applications. Cependant, les conclusions et explications

* Adresse email : francois-pierre.ninove@ec-lyon.fr

sont souvent différentes voire contradictoires et les géométries de texturation optimales dépendent des études, les phénomènes sont attribués au stockage de particules d'usure dans les stries, à la génération de portance supplémentaire dans les stries,... Ce dernier effet n'a pas été démontré théoriquement, ou alors en appliquant des équations en dehors de leur domaine de validité [7]. Afin d'appréhender les phénomènes morphologiques de surfaces appliqués au frottement dans le cadre du contact segment chemise, un tribomètre a été développé. Différents tests en mouvement stationnaire et alternatif sont analysés et commentés.

2 Montages Expérimentaux

2.1 Texturation de surface par LASER (LST) Femtoseconde

Un LASER femtoseconde a été utilisé afin de réaliser des microcavités sur la surface de billes en acier 100C6. Ce procédé de texturation est très complexe et le savoir faire des expérimentations présentées ci-dessus résulte d'une précédente étude [8]. En effet, les paramètres laser comme la forme du faisceau, ses dimensions et l'influence du nombre d'impulsions ont fait l'objet d'une optimisation pour obtenir la géométrie la plus pertinente vis-à-vis des mécanismes étudiés. Les capacités du laser femtoseconde sont les suivantes : la longueur d'onde est de 800 nm, l'énergie maximale par impulsion est 1.5 mJ, la durée d'une impulsion est de 150 fs et la fréquence d'impulsion 1kHz. La morphologie de la surface texturée est contrôlée par topographie interférométrique 3D (figure 1 (a)) ainsi qu'en microscopie électronique à balayage (figure 1 (b)).

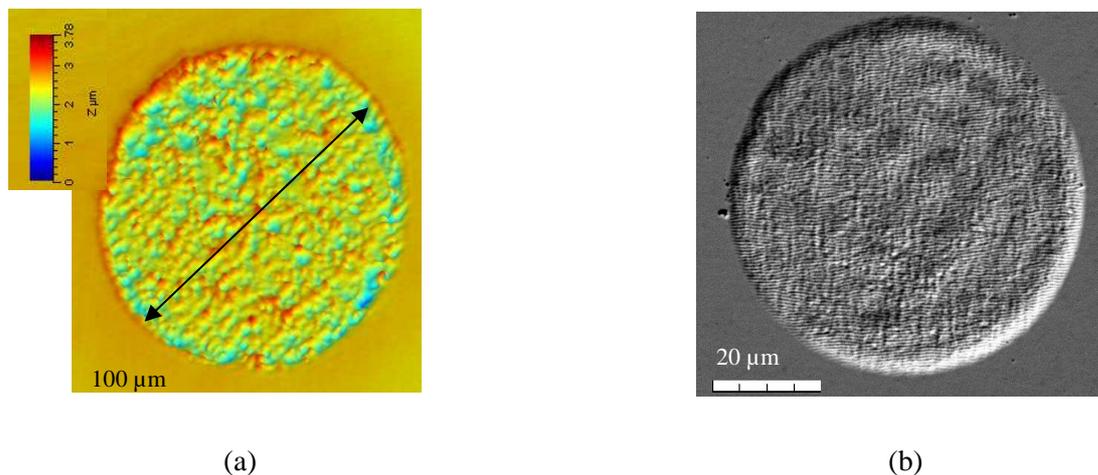


FIG. 1 – (a) Image quantitative d'une cavité obtenu par interférométrie optique, 300 nm de profondeur, (b) Photo qualitative obtenu par Microscopie Electronique à Balayage d'une cavité de diamètre 65 µm et de profondeur 600 nm.

2.2 Caractérisation de films lubrifiants avec des surfaces texturées

L'influence de ces microcavités sur la forme, l'épaisseur de film lubrifiant et le coefficient de frottement ont été visualisés et mesurés grâce au tribomètre IRIS [9]. Son fonctionnement est analogue à celui exposé par Westlake et Cameron [10]. Une représentation est proposée figure 2, avec les différents éléments du montage. Le contact dit EHD est établi entre une bille en acier 100C6 de diamètre 25 mm et un disque de silice de diamètre 60 mm. Ce dernier bénéficie de deux revêtements spécifiques selon la résolution visée pour la mesure des épaisseurs de film lubrifiant. Dans les deux cas, la cavité optique formée par les deux solides permet une mesure précise de la distribution des épaisseurs de film à partir d'images interférométriques obtenues par caméra mono CCD ou rapide.

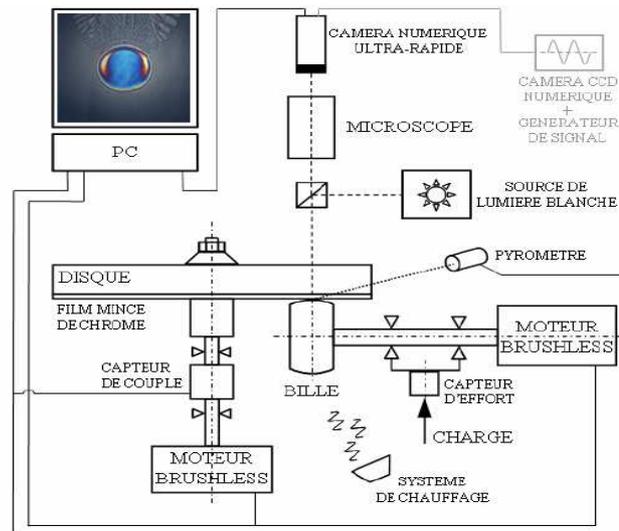


FIG. 2 – Schéma du montage du tribomètre EHD IRIS

L'entraînement des deux solides est contrôlé par deux moteurs brushless à commandes vectorielles qui autorisent une résolution de 0.0001 tr/s dans un éventail de vitesse de 0.001 à 50 tr/s mesurées par deux codeurs de 100 000 points/tour. Ces caractéristiques donnent lieu à une gamme de cinématiques de contact larges. Ainsi, les vitesses d'entraînement U_e et de glissement $U_g(1)$ du fluide sont définies par :

$$U_s = \frac{U_b + U_d}{2} \quad \text{et} \quad U_g = U_b - U_d \quad (1)$$

Où U_b et U_d sont respectivement les vitesses de la bille et du disque. Ces paramètres permettent d'introduire le ratio de roulement-glissement, SRR à partir de l'équation (2). Dans nos expériences, celui-ci varie de -1.8 à 1.8 :

$$SRR = \frac{U_g}{U_e} \quad (2)$$

La durée moyenne du parcours d'une cavité dans un contact de 220 μm est de l'ordre d'une dizaine de millisecondes dans la gamme de vitesse explorée. C'est pour quoi le contact est observé grâce à une caméra numérique couleur ultra-rapide (jusqu'à 160 000 image/s) où la capture d'images est synchronisée avec les mesures des efforts de contact.

3 Résultats et discussions

Durant tous les essais, la charge appliquée est fixée à 10 N soit une pression maximale de 300 MPa représentative de la pression exercée au niveau du contact segment chemise et conduisant à un rayon de contact théorique de Hertz de 220 μm . Une huile minérale sans additifs a été utilisée afin de retrouver les principaux résultats connus [9, 11] et d'obtenir des effets issus uniquement de la texturation. La viscosité est de 200 mPas, et la piézo viscosité est de 0.2 GPa⁻¹. Sur le tribomètre IRIS, les mécanismes de lubrification en présence de surface texturée sont étudiés selon les protocoles explicités ci dessous.

3.1.1 Régime stationnaire sur les surfaces texturées

En roulement pur – sans glissement – la présence de microcavités ne modifie pas la distribution des épaisseurs de films lubrifiants par rapport à une surface lisse. En revanche, l'introduction d'une vitesse de glissement à vitesse d'entraînement constante se traduit par une augmentation transitoire de l'épaisseur de film, localisé à l'arrière de la cité. Ce phénomène est significatif pour des taux de glissement supérieur à 100% et s'amplifie avec la vitesse de cisaillement.

L'analyse de l'épaisseur de film de lubrifiant permet de comprendre le mécanisme de formation de cette surépaisseur locale à partir d'une série d'images prises pour des positions successives de la cavité au cours de son passage dans le contact (figure 3). L'épaisseur de film est mesurée le long de l'axe en pointillé passant par le centre de la cavité et dans la direction du mouvement.

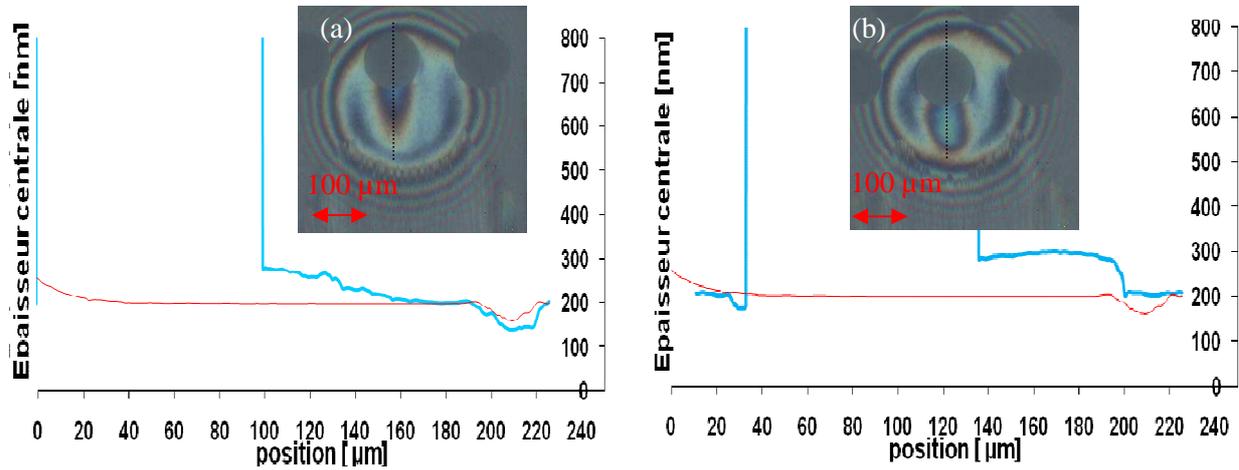


FIG. 3 – Microcavité traversant un contact EHD circulaire en roulement glissement – $U_e = 0.08$ mm/s, $SRR = +1.5$, $\varnothing = 100 \mu\text{m}$ et $h = 300$ nm. Images interférométriques et profils centraux d'épaisseur de film de lubrifiant 400NS. (a) temps t , (b) temps $t+1.5$ ms.

La figure 3 montre une forte augmentation locale des épaisseurs de film de 35 à 48 %. La courbe en rouge donne le profil d'épaisseur de film de lubrifiant avec des surfaces lisses alors que la courbe en bleu représente le profil d'épaisseur obtenu avec une bille microtexturée. L'épaisseur centrale sans la cavité est de 200 nm alors qu'elle atteint 300 nm en présence d'une cavité toute chose étant égale par ailleurs. Ce type de phénomène étant très bref (quelques millisecondes), la charge appliquée est considérée comme constante au cours du passage de la microcavité. La dépression subie par le lubrifiant dans la cavité doit donc s'équilibrer via une augmentation locale de pression au voisinage de la cavité. Cette dernière augmentation a lieu lorsque le lubrifiant franchit, sous l'effet du cisaillement, le bord avant de la microcavité élevant localement par la même occasion la viscosité et par conséquent la portance. Elle induit aussi une déformation élastique additionnelle des surfaces dans la zone correspondante comme l'impose l'équation d'équilibre fondamentale de l'élastohydrodynamique.

Cependant lorsque le taux de glissement varie, certains changements s'opèrent quant à l'amorçage et la propagation de la poche de lubrifiant qui se déverse dans le contact. Après s'être intéressé au mécanisme et aux conditions d'apparition du renforcement transitoire du film de lubrifiant, l'impact du taux de SRR sur sa propagation dans le contact est analysé. La figure 4 illustre l'évolution de l'extension spatiale de la zone de contact d'épaisseur maximale adimensionnée par le diamètre de la cavité, en fonction du taux de glissement.

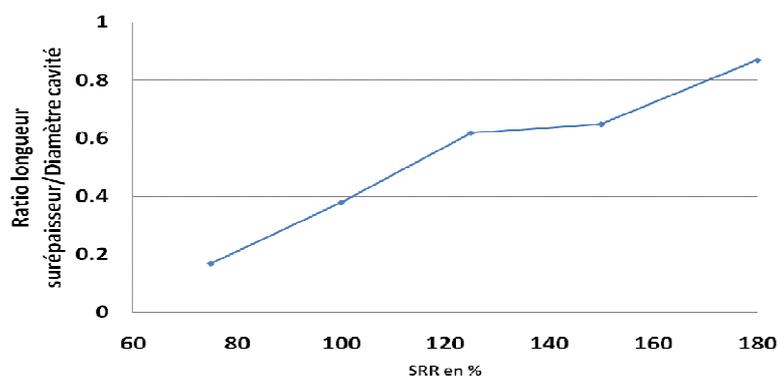


FIG. 4 – Influence du taux de roulement-glissement pour une microcavité – $U_e = 0.08$ mm/s, $\varnothing = 100 \mu\text{m}$ et $h = 300$ nm, lubrifiant 400NS.

Ces expériences montrent que le paramètre SRR contrôle au premier ordre l'amorçage et la longueur de propagation du phénomène. Le cadre de l'étude concerne la simulation du contact segment chemise en glissement pur c'est-à-dire qu'une des surfaces est pratiquement statique pendant que l'autre est en mouvement. Cette condition correspond à un taux de glissement de 2. Du point de vue de la formation et de l'alimentation en lubrifiant, la vitesse hydrodynamique des solides est un paramètre clé. Le parallèle à l'assemblage SPC montre que cette vitesse s'annule au point mort haut et qu'il est probable que le film soit conservé pendant cette phase [11]. Le paragraphe suivant illustre l'étude de tels phénomènes.

3.2 Surfaces texturées en régime transitoire

Afin de simuler, à iso-épaisseur les conditions de lubrification du contact SPC, le tribomètre IRIS a été adapté pour des expérimentations en cinématique alternative. La visualisation du contact en dynamique est réalisée en imagerie rapide. Ce dispositif a permis de suivre en continue l'évolution du film lubrifiant dans l'interface et de la corrélérer à la mesure de l'effort de frottement via le capteur de couple situé sur le système d'entraînement du disque. La figure 5 présente les différents interférogrammes au cours des différentes étapes du mouvement illustré par la figure 6.

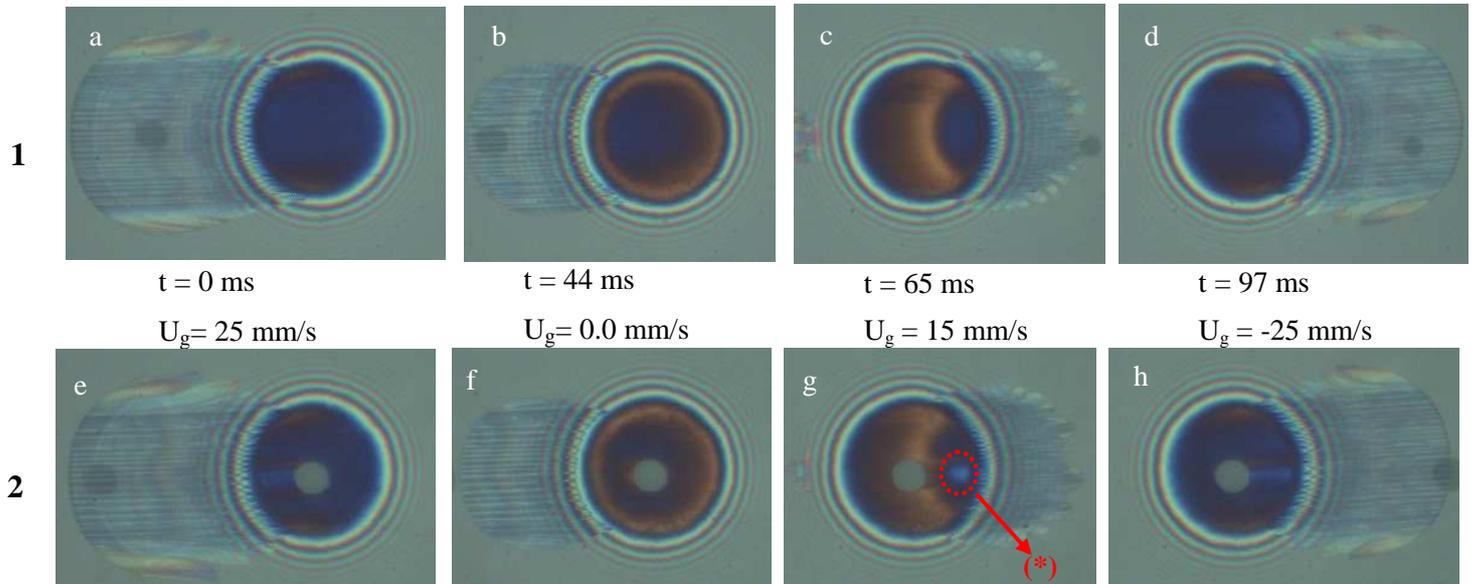


FIG. 5 – Interférogrammes caractéristiques des différentes phases au cours d'un cycle de 0.8 Hz en présence de l'huile 400NS pour une surface lisse et une surface texturée par une cavité.

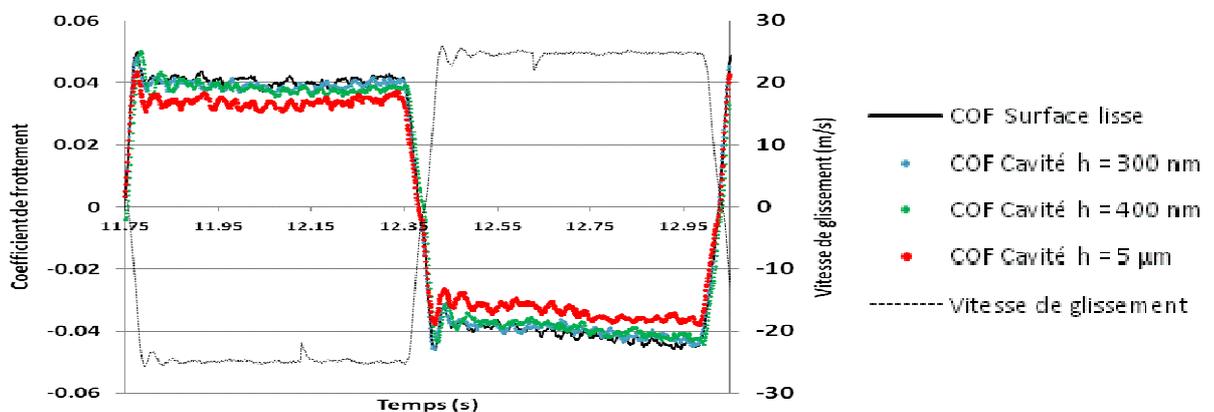


FIG. 6 – Evolution du coefficient de frottement au cours d'un cycle de 0.8 Hz en surface lisse et l'huile 400NS, durée 1.28 ms.

D'après les interférogrammes ci-dessus, on n'observe pas de rupture du film lubrifiant lorsque la vitesse d'entraînement s'annule. Cette dernière fait apparaître une épaisseur de film dans le contact. Ce lubrifiant reste dans le contact est forme l'anneau de couleur claire – figure 5-(b) et (f). En revanche, la phase d'accélération de (b) à (c) (et (f) à (g) également) sur la figure 5 fait apparaître une variation locale de l'épaisseur de lubrifiant (*). Il s'agit de la propagation d'une onde de faible épaisseur dans le contact dont l'existence a été montré par Wang [12] et Meunier [13]. Cette onde se déplace à une vitesse plus faible que la vitesse d'entraînement des solides. En présence de texturation, cette onde, en se propageant expulse l'huile restée piégée dans la cavité et conduit à une augmentation locale de l'épaisseur. En ce qu'il concerne le frottement local du à la perturbation de la texturation (figure 6), celui-ci est diminué en présence d'une cavité profonde – cavité de profondeur 5 µm - contrairement à la surépaisseur locale de lubrifiant renforcée pour une cavité moins profonde – cavité n° 4 et 6 de profondeurs respectivement 300 nm et 400 nm. Ce résultat souligne l'importance de la morphologie de surface en frottement.

4 Conclusion

Ce travail a permis de montrer le rôle clé de la texturation dans la réduction du frottement en régime EHD. Ce procédé de mise en forme de la surface nécessite des conditions particulières de fonctionnement : le cisaillement à l'interface est un paramètre de premier ordre pour activer le renforcement local du lubrifiant. La mise en place d'essais en régime transitoire a conduit à la quantification des contributions de la texturation via l'épaisseur de film lubrifiant (visualisation in situ du contact) et la mesure du frottement ce qui constitue des moyens d'investigation originaux pour simuler expérimentalement le contact segment chemise. Les résultats obtenus ont mis en évidence une sous alimentation sévère dans les périodes d'accélération du disque sous la forme d'une onde faible épaisseur se propageant dans le contact qui fonctionne localement en régime de lubrification limite. L'effet de la texturation sur la friction a eu pour impact de diminuer le frottement pour des cavités profondes.

5 Remerciements

Les auteurs remercient Mr Mathieu Guibert pour ses conseils techniques sur Labview.

References

1. Schneider, Y.G., *Formation of Surfaces with Uniform Micropatterns on Precision Machine and Instruments*. *Precis. Eng.*, 1984. **6**: p. 219-225.
2. Saka, A., M.J. Lio, and N.P. Suh, *The Role of Tribology in Electrical Contact Phenomena*. *Wear*, 1984. **100**: p. 77-105.
3. Saka, N., H. Tian, and N.P. Suh, *Boundary Lubrification of Undulated Metal Surfaces at Elevated Temperatures*. *Tribol. Trans.*, 1989. **32**(3): p. 389-395.
4. Tian, H., N. Saka, and N.P. Suh, *Boundary Lubrification Studies on Undulated Titanium Surfaces*. *Tribol. Trans.*, 1989. **32**(3): p. 289-296.
5. Suh, N.P., M. Mosleh, and P.S. Howard, *Control of Friction*. *Wear*, 1994. **175**: p. 151-159.
6. Mosleh, M., S.J.P. Laube, and N.P. Suh, *Friction of Undiluted Surfaces Coated with MoS₂ by Pulsed Laser Deposition*. *Tribol. Trans.*, 1999. **42**(3): p. 495-502.
7. Ronen, A., I. Etsion, and Y. Kligerman, *Friction-Reducing Surface-Textured in Reciprocating Automotive Components*. *Tribology Transactions*, 2001. **44**(3): p. 359-366.
8. Mourier, L., et al., *Action of femtosecond laser generated micro-cavity passing through a circular EHL contact*. *Wear*, 2007. **264**: p. 450-456.
9. Mourier, L., et al., *Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts*. *Tribology International*, 2006. **39**: p. 1745-1756.
10. Westlake, F.-J. and A. Cameron, *Optical elastohydrodynamic fluid testing*. *ASLE Transactions*, 1972. **15**(81-95).
11. Mourier, L., *Optimisation des contacts elastohydrodynamiques par la micro-texturation des surfaces*, in *Ecole Centrale*. 2007: Lyon.
12. Wang, J., et al., *Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion*. *Tribology International*, 2005. **38**: p. 1013-1021.
13. Meunier, C., *Vieillessement des lubrifiants et compréhension des mécanismes de lubrification - Application à la zone Segment-Piston-Chemise*, in *Ecole Centrale de Lyon*. 2008: Lyon.