

Etude du comportement tribologique d'un composite PTFE/Bronze/MoS₂ en glissement sec et lubrifié

M. TRABELSI^a, M. KHARRAT^b et M. DAMMAK^c

- a. Laboratoire des Systèmes Electromécaniques, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Route de Soukra km 3,5, B.P. 1173, 3038 Sfax, TUNISIE, medtrabelsi.enis@yahoo.com.
b. Laboratoire des Systèmes Electromécaniques, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Route de Soukra km 3,5, B.P. 1173, 3038 Sfax, TUNISIE, mohamed.kharrat@ipeis.rnu.tn.
c. Laboratoire des Systèmes Electromécaniques, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Route de Soukra km 3,5, B.P. 1173, 3038 Sfax, TUNISIE, maher.dammak@ipeis.rnu.tn.

Résumé :

Les réponses en frottement et en usure d'un composite PTFE/Bronze/MoS₂ utilisé dans les bagues de guidage de vérins hydrauliques sont analysées en conditions de glissement sec et lubrifié. Un tribomètre bille/plan à mouvement linéaire alterné est utilisé pour la caractérisation expérimentale du comportement tribologique du composite. Le passage du contact sec au contact lubrifié engendre une réduction importante du coefficient de frottement. Le coefficient de frottement présente une croissance rapide au-delà de 20.000 cycles en condition de glissement sec alors qu'il présente une croissance progressive dès le début de l'essai pour se stabiliser à partir de 20.000 cycles en condition de glissement lubrifié. La sévérité de l'usure est largement réduite avec la lubrification. Pour les deux conditions de glissement, le volume d'usure présente initialement une croissance progressive pour se stabiliser vers la fin de l'essai. En condition de glissement sec, un mécanisme d'usure initialement adhésif cède la place vers la fin de l'essai à un mécanisme abrasif suite à la production de particules et/ou aspérités dures dans le contact. En condition de glissement lubrifié, la présence de l'huile dans le contact empêche l'oxydation des particules de MoS₂ en particules dures de MoO₃, ce qui permet d'améliorer les réponses en frottement et en usure.

Abstract :

Friction and wear responses of PTFE/Bronze/MoS₂ composite used in guide rings of hydraulic actuators are analyzed in dry and lubricated sliding conditions. A ball-on-flat tribometer with linear alternated motion is used for the experimental characterization of the tribological behavior of the composite. The transition from the dry contact to the lubricated contact leads to an important decrease of the friction coefficient. The friction coefficient experiences a rapid increase beyond 20.000 cycles in dry sliding condition while it experiences a progressive increase from the beginning of the test to stabilize since 20.000 cycles in lubricated condition. The wear severity is largely reduced with lubrication. For both sliding conditions, the volume loss shows an initial progressive increase to stabilize toward the end of the test. In dry sliding condition, initially adhesive wear mechanism gives way to an abrasive wear mechanism as a consequence of the production of hard particles and/or asperities in the contact. In lubricated sliding condition, the presence of oil in the contact prevents the oxidation of MoS₂ particles in MoO₃ hard particles, thereby improving the friction and wear responses.

Mots clefs : PTFE; Composite; Bronze; MoS₂; Frottement; Usure; Glissement sec, Glissement lubrifié.

1 Introduction

Les composites à matrice polytétrafluoroéthylène (PTFE) renforcés par des charges particulières sont largement utilisés dans différents secteurs d'ingénierie grâce à leurs propriétés mécaniques et tribologiques intéressantes. Ces propriétés sont largement dépendantes du type et de la fraction des charges [1]. Il a été montré que les particules de charges préservent la structure en bande du PTFE et ainsi la formation de larges particules d'usure durant le glissement [2-3]. En particulier, les particules de bronze sont utilisées à chaque fois où l'amélioration de la réponse tribologique de la matrice PTFE est recherchée [4-6]. En effet, le mécanisme d'usure du PTFE est caractérisé par la formation d'un film de transfert sur la surface de l'antagoniste et l'adhésion de ce film est améliorée par les particules de bronze [7]. Cependant, les particules de bronze peuvent conduire à une augmentation du coefficient de frottement, à l'activation de l'abrasion et à la réduction de l'intégrité mécanique et de la résistance chimique du composite durant le glissement [8]. Des particules de lubrifiants solides comme le bisulfure de molybdène (MoS₂) sont parfois rajoutées avec les particules de bronze à la matrice PTFE. Cependant, l'association de ces deux types de charges ne conduit pas au renforcement des performances tribologiques du composite pour toutes les conditions opératoires. En effet, l'interaction des particules de lubrifiant solide avec la matrice en polymère est sensible à l'environnement du contact et donc la réponse tribologique du composite devrait être explorée pour différents environnements [9, 10]. La réponse tribologique en glissement sec des composites à matrice PTFE chargés par des particules de bronze et/ou de MoS₂ a fait alors l'objet de nombreuses recherches [2, 4-7, 11]. Cependant, le champ d'application de ces composites a été élargi pour des utilisations dans des environnements lubrifiés à l'huile ce qui nécessite la caractérisation de la réponse en frottement et en usure de ces matériaux dans des conditions de glissement lubrifiées.

Dans cette étude, notre intérêt est porté à l'analyse du comportement tribologique d'un composite PTFE/Bronze/MoS₂ utilisé dans les bagues de guidage de vérins hydrauliques. Les évolutions du coefficient de frottement et du volume d'usure avec le nombre de cycles ainsi que les mécanismes d'usure en conditions de glissement sec et lubrifié ont été analysés et comparés.

2 Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux

Un matériau composite à matrice PTFE, disponible sur le marché et utilisé dans les bagues de guidage de vérins hydrauliques, a été considéré dans cette étude. Le matériau est fourni sous forme de bande de section 15×3 mm². Le Tableau 1 donne les fractions massiques des constituants du composite. La microstructure du matériau composite a été analysée au moyen d'un microscope électronique à balayage (MEB) de type JSM-5400. Une micrographie typique est donnée par la figure 1 et montre clairement une répartition homogène des charges particulières dans la matrice PTFE. Toutefois, la micrographie montre une mauvaise adhésion entre les charges et la matrice. Les caractéristiques mécaniques en traction du matériau de l'étude sont rassemblées dans le tableau 2.

PTFE (% massique)	Bronze (% massique)	MoS ₂ (% massique)
55	40	5

Tableau 1 Composition du composite à base de PTFE.

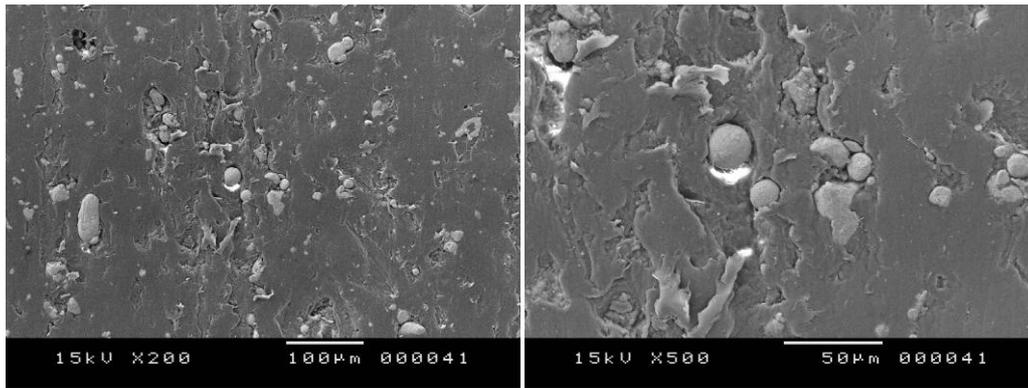


Figure 1 Microstructure du composite à base de PTFE.

Module d'élasticité (MPa)	Contrainte à la rupture (MPa)	Déformation à la rupture (%)
582±2	16,5±0,2	512±7

Tableau 2 Caractéristiques mécaniques en traction du composite à base de PTFE.

2.2 Caractérisation tribologique

Des échantillons composites de 15 mm de longueur ont été découpés dans la bande fournie pour la conduite des essais de frottement et d'usure. La surface de ces échantillons présente une rugosité arithmétique moyenne de 16 µm. Les essais de frottement et d'usure ont été conduits contre une bille en acier au chrome (100Cr6) de 18mm de rayon dont la surface présente une rugosité de 0,06 µm. Un tribomètre bille/plan à mouvement linéaire alterné développé dans notre laboratoire est utilisé (Fig. 2). L'échantillon composite est d'abord collé au fond du bain d'huile. Avant le début de l'essai, l'huile de lubrification est rajoutée jusqu'à ce que la surface de l'échantillon soit totalement recouverte. Cette huile est choisie parmi les huiles synthétiques commerciales les plus utilisées avec les vérins hydrauliques (Densité à 15°C : 0,87 Kg l⁻¹, Viscosité à 40°C : 31,2 mm²s⁻¹, Indice de viscosité : 100, Point d'éclair : 202 °C). Le tribomètre permet le contact entre la bille en acier et la surface plane de l'échantillon composite sous un effort normal constant de 81,3N. La bille en acier est maintenue fixe alors qu'un mouvement tangentiel cyclique, d'amplitude 7,5mm et de fréquence 1Hz, est appliqué à l'échantillon composite au moyen d'un système bielle-manivelle commandé par un groupe moto-réducteur électrique équipé d'un variateur électronique de vitesse. L'effort tangentiel de frottement est mesuré à l'aide d'un capteur placé entre le support de l'échantillon composite et la glissière du système bielle-manivelle. La sortie de ce capteur d'effort est enregistrée en continue à l'aide d'un système d'acquisition. Avant chaque essai, les surfaces de la bille d'acier et de l'échantillon composite sont soigneusement nettoyées à l'éthanol puis séchées. Les essais ont été conduits pour différents nombres de cycles : 7.200, 18.000, 25.200, 36.000 et 79.200 cycles. Pour chaque nombre de cycles, trois essais ont été développés au minimum. A la fin de chaque essai, la morphologie de la trace d'usure sur la surface de l'échantillon composite est examinée à l'aide du microscope électronique à balayage alors que la trace d'usure sur la surface de la bille d'acier est explorée au moyen du microscope optique. Un rugosimètre de type « SJ-210 Hand-held Roughness Tester » est utilisé pour établir le profil de la trace d'usure sur l'échantillon composite dans la direction transversale. Sur la base de ce profil, la section transversale S (mm²) du sillon d'usure est calculée, ce qui permet de déduire le volume d'usure V (mm³). Le même tribomètre ainsi que le même protocole expérimental ont été utilisés pour la caractérisation de la réponse tribologique du composite à base de PTFE en condition de glissement sec.

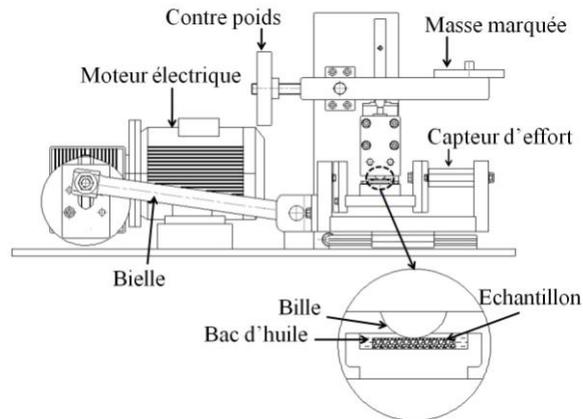


Figure 2 Tribomètre bille/plan à mouvement rectiligne alterné.

3 Résultats et discussions

La figure 3 donne des évolutions typiques du coefficient de frottement avec le nombre de cycles pour les deux conditions de glissement sec et lubrifié. Il apparaît clairement que la réponse en frottement du composite a été améliorée avec la lubrification. En effet, après 36.000 cycles le coefficient de frottement atteint une valeur de 0,26 en condition de glissement sec alors qu'en condition de glissement lubrifié la valeur atteinte après le même nombre de cycles est de 0,07 seulement. De plus, en condition de glissement sec, le coefficient de frottement présente une croissance rapide au-delà de 20.000 cycles est ce jusqu'à la fin de l'essai (36.000 cycles). Cependant, en condition de glissement lubrifié le coefficient de frottement présente une croissance progressive dès le début de l'essai pour atteindre une valeur stable à partir de 20.000 cycles.

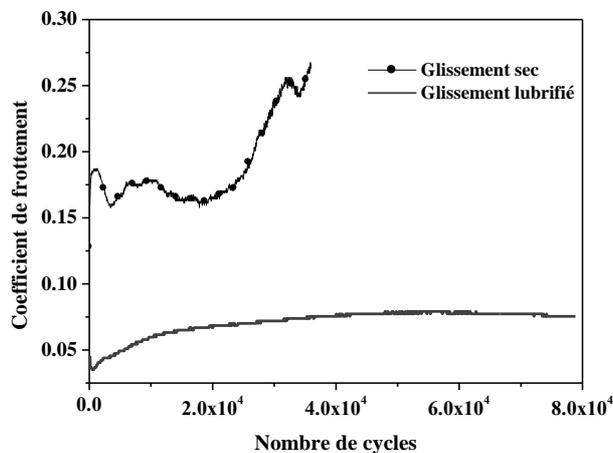


Figure 3 Evolution du coefficient de frottement avec le nombre de cycles.

L'évolution du volume d'usure avec le nombre de cycles est illustrée dans la figure 4 pour les deux conditions de glissement sec et lubrifié. La figure montre que le passage du contact sec au contact lubrifié engendre une décroissance significative de la sévérité de l'usure. De plus, pour les deux conditions de glissement, le volume d'usure présente initialement une croissance progressive pour se stabiliser vers la fin de l'essai.

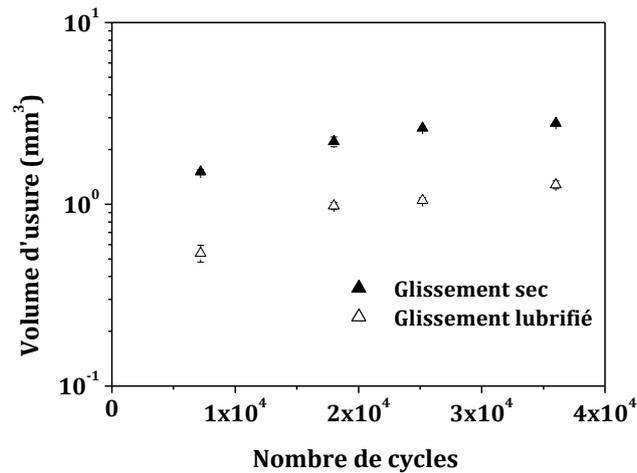


Figure 4 Evolution du volume d'usure avec le nombre de cycles.

Une micrographie MEB de la surface usée du composite et une micrographie optique de la contreface d'acier sont données par la figure 5, pour la condition de glissement sec, et par la figure 6 pour la condition de glissement lubrifié. Il a été trouvé qu'après 36.000 cycles de glissement sec, un réseau de microfissures est développé en surface du composite conduisant à une structure en faïençage (Fig. 5 (a)). Cependant, une série de stries parallèles à la direction de glissement a été observée sur la contreface en acier (Fig. 5 (b)). Ces résultats peuvent être associés à un mécanisme d'usure initialement adhésif (réseau de faïençage) qui cède la place vers la fin de l'essai à un mécanisme abrasif (série de stries) suite à la production de particules et/ou aspérités dures dans le contact durant le glissement sec. En effet, il a été montré dans d'autres travaux [12, 13] que les particules de lubrifiant solide MoS₂ peuvent donner lieu à des particules dures de MoO₃ sous l'effet des sollicitations thermiques et mécaniques. Après 36.000 cycles de glissement lubrifié, les traces d'usure sur l'échantillon composite et sur la contreface en acier sont caractérisées par un aspect lisse avec la présence de débris (Fig. 6 (a) et (b)). Dans ces conditions, la lubrification et le refroidissement assurés par l'huile empêchent l'oxydation des particules de charges, en particulier la transformation du MoS₂ en MoO₃, et permettent de réduire la destruction de la matrice PTFE et de la contreface en acier. En conséquence, les réponses en frottement et en usure du composite à base de PTFE en condition de glissement lubrifié se trouvent nettement améliorées.

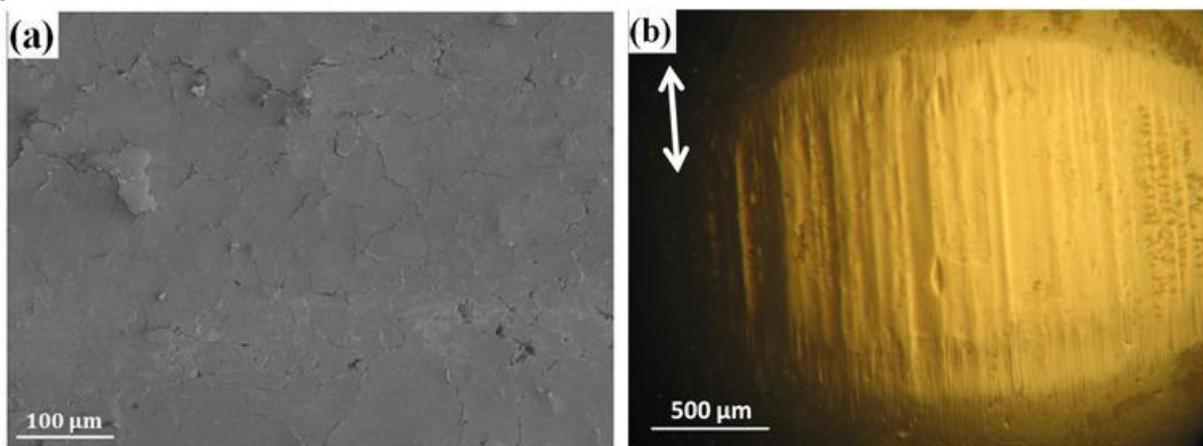


Figure 5 (a) Micrographie MEB de la trace d'usure sur la surface du composite ; (b) Micrographie optique de la surface de l'antagoniste en acier (Glissement sec, 36 000 cycles).

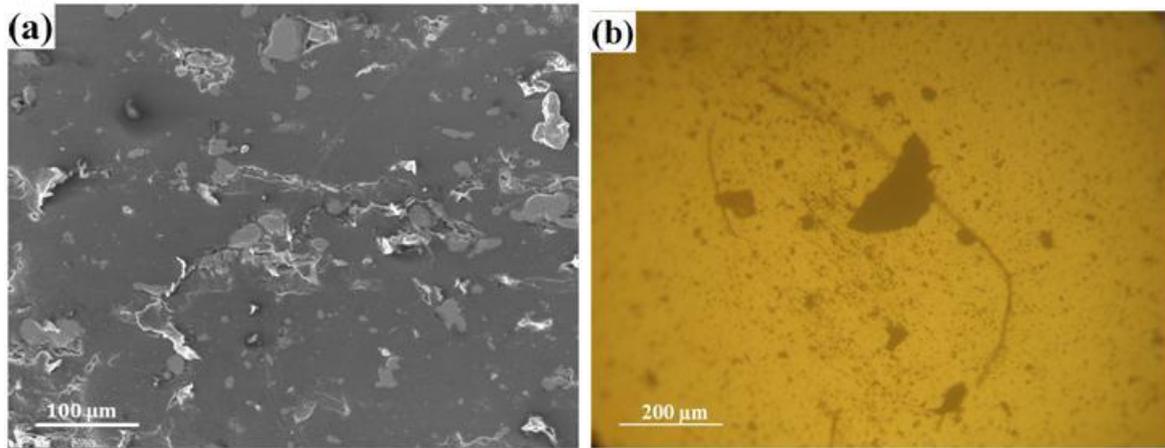


Figure 6 (a) Micrographie MEB de la trace d'usure sur la surface du composite ; (b) Micrographie optique de la surface de l'antagoniste en acier (Glissement lubrifié, 36 000 cycles).

4 Conclusions

- La réponse en frottement du composite à base de PTFE a été largement améliorée avec la lubrification.
- En condition de glissement sec, le coefficient de frottement présente une croissance rapide au-delà de 20.000 cycles.
- En condition de glissement lubrifié, le coefficient de frottement présente une croissance progressive dès le début de l'essai pour atteindre une valeur stable à partir de 20.000 cycles.
- Le passage du contact sec au contact lubrifié engendre une décroissance significative de la sévérité de l'usure.
- Pour les deux conditions de glissement, le volume d'usure présente initialement une croissance progressive pour se stabiliser vers la fin de l'essai.
- Durant le glissement sec, un mécanisme d'usure initialement adhésif cède la place vers la fin de l'essai à un mécanisme abrasif suite à la production de particules et/ou aspérités dures dans le contact.
- La lubrification et le refroidissement assurés par l'huile empêchent l'oxydation des particules de MoS_2 en particules dures de MoO_3 , ce qui permet d'améliorer les réponses en frottement et en usure.

Références

- [1] A. Khoddamzadeh, R. Liu, X. Wu, Novel polytetrafluoroethylene (PTFE) composites with newly developed triballoy alloy additive for sliding bearings, *Wear* 266 (2009) 646-657.
- [2] S. Bahadur, D. Tabor, The wear of filled Polytetrafluoroethylene, *Wear* 98 (1984) 1-13.
- [3] T. Blanchet, F. Kennedy, D. Jayne, XPS analysis of the effect of fillers on PTFE transfer film development in sliding contacts, *Tribology Transactions* 36 (1993) 535-540.
- [4] E. Jisheng, D. T. Gawne, Tribological performance of bronze-filled PTFE facings for machine tool slideways, *Wear* 176(1994) 195-205.
- [5] T. Tevrüz, Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings, *Wear* 230 (1999) 61-69.
- [6] H. Unal, U. Sen, A. Mimaroglu, An approach to friction and wear properties of polytetrafluoroethylene composite, *Materials & Design* 27 (2006) 694-699.

- [7] Y. Wang, F. Yan, A study on tribological behaviour of transfer films of PTFE/bronze composites, *Wear* 262 (2007) 876-882.
- [8] B. Briscoe, A. Pogosian, D. Tabor, Friction and wear of high-density Polythene - action of lead oxide and copper oxide fillers, *Wear* 27 (1974) 19-34.
- [9] J. Bijwe, J. Rajesh, A. Jeyakumar, A. Ghosh, U.S. Tewari, Influence of solid lubricants and fibre reinforcement on wear behaviour of polyethersulphone, *Tribology International*, 33 (2000), 697-706.
- [10] J. H. Jia, H. D. Zhou, S.Q. Gao, J. M. Chen, A comparative investigation of the friction and wear behavior of polyimide composites under dry sliding and water-lubricated condition, *Materials Science and Engineering A* 356 (2003) 48-53.
- [11] K. Tanaka, S. Kawakami, Effect of various fillers on the friction and wear of Polytetrafluoroethylene-based composites, *Wear* 79 (1982) 221-234.
- [12] H. J. Zhang, Z. Z. Zhang, F. Guo, Studies of the influence of graphite and MoS₂ on the tribological behaviors of hybrid PTFE/Nomex fabric composite, *Tribology Transactions* 54(2011) 417-423.
- [13] X. Li, Y. Gao, J. Xing, Y. Wang, L. Fang, Wear reduction mechanism of graphite and MoS₂ in epoxy composites, *Wear* 257(2004) 279-283.