

Magnéto-tribologie des contacts glissants ferromagnétiques

H. Zaïdi, M. Amirat, C. Vallée et J. Frêne

Laboratoire LMS, UMR 6610, Université de Poitiers, UFR Sciences, Université de Poitiers, Boulevard Marie et Pierre Curie, Téléport 2, BP 30179, 86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL, FRANCE
e-mail : zaidi@lms.univ-poitiers.fr

Résumé

Les contacts glissants des couples de matériaux ferromagnétique/ferromagnétique sont largement influencés par la présence d'un champ magnétique dans la zone du contact. L'oxydation des surfaces fraîches cisailées aux jonctions de contact est activée par l'application du champ magnétique. Cette activation est induite par les forts gradients magnétiques au niveau des jonctions et des phénomènes d'induction engendrés par la variation temporelle et cyclique du champ magnétique à travers les jonctions de contact qui se renouvellent continuellement dans le contact.

Les essais réalisés montrent que l'application du champ magnétique favorise notamment la formation des oxydes ferromagnétiques pour préserver le passage magnétique à travers le contact et le taux des spins positifs.

Dans cette étude nous présenterons les résultats tribologiques et la morphologie des surfaces usées de contact ferromagnétique/ferromagnétique à l'air libre ou bien sous vide poussé à 10^{-5} Pa avec ou sans champ magnétique autour du contact pour comparer les phénomènes observés. Puis nous discuterons les processus magnétiques et physico chimiques mis en jeu dans le contact glissant magnétisé.

Abstract :

Applied magnetic field around the rotating sliding ferromagnetic steel/steel modifies the friction and the wear behaviour of the contact. The friction tests were conducted in ambient air or in high vacuum chamber 10^{-5} Pa. The applied normal load is 18,5N. Without magnetic field, the contact is ductile steel against steel in a severe adhesive grooving mode. When a magnetic field is applied, the contact in ambient air progressively became black, covered by a brittle thick black layer of oxides which leads to a low friction and a low wear mode after some hundred cycles.

X-ray diffraction analysis of magnetized wear particles reveals the existence of ferromagnetic γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄ oxide. This result shows that the magnetized contact enhances the ferromagnetic oxide growth to the detriment of the non ferromagnetic oxides α -Fe₂O₃ and FeO, following the electronic spin conservation theory.

The magneto-tribological behaviour phenomenon occurs especially in ferromagnetic/ferromagnetic sliding couples as it was shown by different experimental studies on different couples. The contact asperities of rotated disc in magnetic field are continuously submitted to the high magnetic flux variation from zero to B and from B to zero, which leads to electrical field creation E. Then, tribochemical activation can be explained by the tunnel effect related to the induced electrical field E by applied magnetic field in the rotating disc.

This study will present the tribological behaviour in ambient air and in vacuum

Mots-clefs : Friction ; acier ferromagnétique, contact magnétisé.

1 Introduction

L'application d'un champ magnétique H de quelques kilo Ampères/m à travers le tribocontact cyclique pion/plan glissant acier XC48 ferromagnétique / acier XC48 ferromagnétique modifie le comportement tribologique du contact Muju (1980), Hiratsuka *et al.* (1987), Chin *et al.* (2005). En présence du champ magnétique, Les surfaces de contact se couvrent progressivement d'un film d'oxyde noir après quelques dizaines de cycles. Les débris

d'usure changent également de morphologie, de taille et de couleur. On passe d'un régime de débris d'usure métalliques sous forme de copeaux brillants filaires avant l'application du champ magnétique à des particules d'oxyde fines sphériques de couleur noire en présence du champ.

Dans cette étude, nous allons présenter le comportement tribologique du contact magnétisé, la morphologie des surfaces glissantes avec ou sans champ magnétique sous différents environnements gazeux puis l'analyse par diffraction des rayons X des particules d'usure du contact.

2 Résultats expérimentaux

2.1 Influence du champ magnétique sur le frottement et l'usure du contact

Les essais de frottement sont effectués sur un tribomètre de type pion/disque localisé dans une enceinte sous vide muni d'un groupe de pompage qui permet de descendre à une pression de gaz résiduel 10^{-5} Pa. Elle est munie également de vannes d'introduction de gaz. Le pion de section plane de diamètre 10 mm et le disque de diamètre 250 mm sont en acier XC48 ferromagnétique. La vitesse relative de glissement est $v = 0,38$ m/s et la charge normale varie de 60 N à 240 N. Le champ magnétique est créé à l'aide d'une bobine qui enroule la section cylindrique du pion [10].

Pour clarifier le mécanisme d'oxydation, nous avons effectué des tests identiques avec ou sans champ magnétique à l'air libre et sous vide poussé. La discussion des résultats expérimentaux est basée sur l'observation des surfaces de contact par microscopie et par analyse de diffraction aux rayons X pour identifier les éléments présents à la surface du contact.

2.1.1 Essais à l'air libre

Le coefficient de frottement du couple à l'air libre sans champ magnétique est variable autour d'une valeur moyenne de $\mu = 0,6$. Le contact glissant sans champ magnétique est un contact métal/métal caractérisé par un régime d'usure sévère abrasive accompagné par des déformations plastiques de la surface de contact (Fig.1-a). Cependant, sous champ magnétique et à l'air libre, le coefficient de frottement est stable autour de la valeur $\mu = 0,40$. En effet, le champ magnétique modifie la nature du contact. Les pistes de contact sont couvertes de débris d'oxyde de fer. Au début du frottement sous champ magnétique, l'épaisseur de la couche d'oxyde s'accroît jusqu'à la couverture totale de la piste de contact d'une couche d'oxyde extrêmement mince et noire à caractère fragile (Fig.1-b). La formation de cette couche et son épaisseur sont fonctions de l'intensité du champ magnétique et de la charge normale appliquée. La couche d'oxyde rend la surface moins rugueuse que celle obtenue sans champ magnétique. Par ailleurs, l'usure au début du frottement en présence du champ magnétique est de type abrasive durant les premiers cycles de rotation du disque, puis le film d'oxyde s'accroît jusqu'à recouvrement total. Ce film adhère à l'interface de contact et modifie la rhéologie de contact par la réduction de la force de frottement dans le contact, il facilite le glissement et diminue l'endommagement et l'usure dus aux déformations plastiques. Des grains d'oxyde ferromagnétiques sont produits en petite quantité. Ils restent attachés à la piste de contact par la force magnétique, et forment ainsi un lubrifiant solide qui réduit l'usure par un facteur d'au moins 40.

L'application du champ magnétique autour du tribocontact à l'air libre accélère la formation du film d'oxyde sur la surface. Le régime d'usure passe d'un régime d'usure abrasive à un régime doux à usure par oxydation.

La force d'attraction magnétique maintient les débris d'usure à l'interface du contact et permet de produire dans le temps avec le mouvement cyclique du disque les particules d'usure fines favorables à la protection de surface et à la diminution du taux d'usure. Une longue

rétenion des débris d'usure en surfaces de contact, conduit à une croissance de la tribo-oxydation.

2.1.2 Essais sous vide poussé

Quand le test de frottement est effectué sous vide poussé à 10^{-5} Pa, les particules d'usure du disque en acier sont transférées sur la surface de contact du pion. La surface de contact du pion est usée. La piste de frottement du disque est plus rugueuse (Fig.1-c) que celle à l'air libre, cette rugosité provient du décollement de la matière du disque vers le pion provoqué par la haute adhérence pion/disque due à la basse pression du gaz et à l'usure abrasive. Les débris d'usure sont de taille, environ 0,5 mm, plus grosse que ceux obtenus à l'air libre. Ces particules sont sous forme de filaments métalliques XC48. Le coefficient de frottement sous vide est de l'ordre de $\mu=0,60$.

En présence du champ magnétique, l'usure sous vide est plus sévère que celle sans champ magnétique, cela est attribué à la rétenion dans le contact des particules métalliques ferromagnétiques tenues par le champ magnétique (Fig.1-d). Ces particules s'incrustent dans les pistes de contact produisent un ancrage mécanique dans l'interface qui augmente naturellement l'usure et le frottement sous champ magnétique.

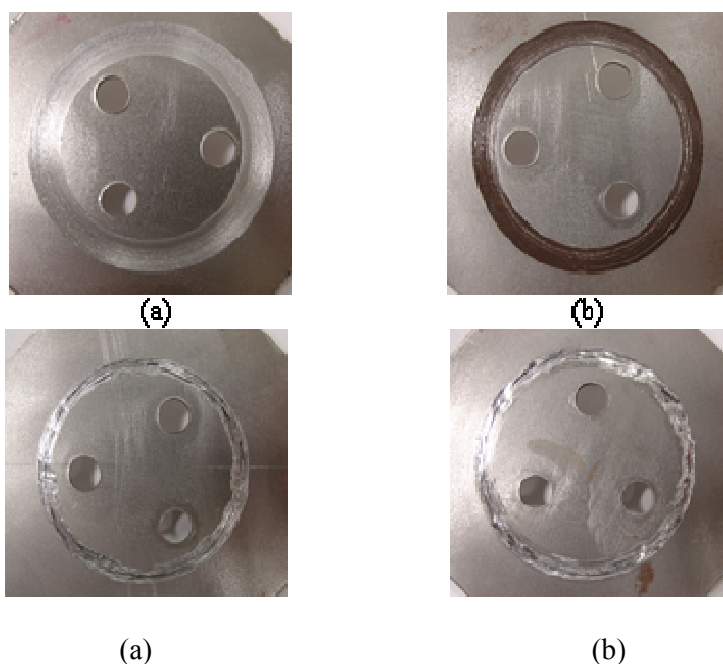


FIG.1 : surface de contact pion XC48/disque XC48 sous les conditions tribologiques :
 (P= 18,5 N, v=0,5m/s, t = 30 min)
 - a l'air libre : (a) H = 0 kA /m, (b) H = 20 kA/m
 - Sous vide poussé : (a) H = 0 kA /m, (b) H = 20 kA/m

2.2 Identification des oxydes dans les particules d'usure éjectées par le contact.

Nous avons procédé à une identification par diffraction des rayons X des particules d'usure (poudres) récoltées durant le test de frottement par éjection du contact. Cette analyse permet de mieux comprendre le rôle du troisième corps dans le contact.

Les particules d'usure issues du contact glissant non magnétisé sont composées essentiellement du fer et de la cémentite de l'acier utilisé XC48. Cependant, les particules d'usure issues du contact magnétisé sont composées pratiquement des deux oxydes

ferromagnétiques la magnétite Fe_3O_4 et la maghémite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Ces deux oxydes à caractère fragiles, jouent un rôle bénéfique en tant que troisième corps au niveau du contact magnétisé.

Quant à l'oxyde ferreux FeO , il est pratiquement inexistant dans les particules d'usure du contact magnétisé. On peut donc suggérer que la température réelle de contact dans ces conditions ne dépasse pas de façon sensible $600\text{ }^\circ\text{C}$, température minimale favorable à la formation de FeO . De même l'hématite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ qui est non ferromagnétique, est non existante dans les particules d'usure du contact magnétisé.

L'analyse des particules d'usure obtenues sous vide avec ou sans champ magnétique, montre que leurs compositions chimiques ne changent pas, c'est-à-dire qu'elles ont la même composition que l'acier XC48.

L'ensemble de ces analyses chimiques par diffraction des rayons X explique bien l'activation de l'oxydation du contact par la présence du champ magnétique autour du tribocontact.

3 Discussion

3.1 Influence du champ magnétique sur l'oxydation.

Pour activer l'oxydation, les deux surfaces de contact doivent être ferromagnétiques. Car nous avons testé un acier ferromagnétique contre un acier inoxydable non ferromagnétique, mais la présence du champ magnétique ne modifie rien au contact. L'activation est induite par la constriction des lignes du champ à travers les jonctions de contact. Les débris d'usure ferromagnétiques sont soumis continuellement à des variations intenses du flux magnétique.

Par ailleurs, les gradients du champ magnétique au voisinage des jonctions de contact modifient la composition gazeuse autour du tribocontact. L'oxygène moléculaire O_2 paramagnétique est attiré dans les régions à fort champ magnétique autour des jonctions de contact fortement aimantées et continuellement fraîches par cisaillement. Cependant, les substances diamagnétiques, tel que l'azote N_2 seront conduites vers la région à faible champ magnétique. La densité d'oxygène dilué dans l'azote augmente ainsi au voisinage de la surface de contact, en particulier au voisinage des aspérités de contact. Ce qui accentue la réaction d'oxydation autour de cette région.

3.2 Potentiel électrique de contact induit par la variation du champ magnétique dans les jonctions de contact

Dans le contact soumis à un champ magnétique, le flux magnétique passe via l'espace très étroit à l'interface, à travers les aspérités en contact avec une perturbation des lignes du flux. Ainsi, se localise une forte concentration du flux sur les aspérités. Les lignes de force d'induction magnétique y seront très resserrées.

Le renouvellement des jonctions de contact par la rotation du disque engendre une variation locale du flux magnétique $\Delta\Phi = B_j S_r$ lors de la phase entrante des jonctions sous le pion suivie de $-\Delta\Phi = -B_j S_r$ lors de leur phase sortante.

Où B_j est le champ magnétique au niveau des jonctions de contact. S_r est la surface réelle de contact. La vitesse de variation du flux magnétique dépend de la vitesse relative de glissement et crée ainsi une tension électrique V_L localisée aux jonctions de contact selon la loi de Lenz :

$$V_L = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{B_j S_r}{\Delta t} \quad -V_L = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{B_j S_r}{\Delta t}$$

L'énergie de Lenz d'une charge q varie ainsi de $-|qV_L|$ à $|qV_L|$ lors d'un passage du disque devant le champ magnétique. Dans sa phase anodique $V_L > 0$, elle active l'oxydation des surfaces.

3.3 Probabilité de transfert des charges par effet tunnel dans le contact magnétisé

La réactivité des surfaces en frottement change avec l'application du champ magnétique. En effet Pan [9] a montré que, dans une enceinte à environnement contrôlé sous une pression $P = 10^{-3}$ à 10^{-4} Pa d'oxygène, l'application du champ magnétique accroît la consommation de l'oxygène dans le contact dynamique des aciers XC 45. La mesure de la pression du gaz maintenu au début, en régime dynamique à la pression P d'oxygène, dans l'enceinte, montre que la chute de pression du gaz durant le frottement est plus importante lorsque le champ magnétique est appliqué au contact.

Cette activation peut avoir lieu par effet tunnel à travers la couche d'oxyde. En effet La croissance de la magnétite se fait par diffusion de l'oxygène à travers le film d'oxyde vers le cœur métallique ou par diffusion des ions de fer vers l'interface air/oxyde. L'effet tunnel électronique et ionique joue un rôle important dans les mécanismes réactionnels chimiques et augmente la vitesse des réactions chimiques. Analysons ainsi les effets tunnels des charges à travers la couche d'oxyde du fer en présence du champ magnétique dans le contact.

L'équation de mouvement de Schrödinger d'une particule de masse m , d'énergie E et de charge q permet de calculer la probabilité P de saut par effet tunnel à travers une barrière de largeur a et d'énergie potentielle V supérieure à l'énergie E de la particule. En effet pour une diffusion uni axiale suivant l'axe x (Fig. 2), l'équation du mouvement de la particule en coordonnées cartésiennes s'écrit:

- A l'extérieur de la couche d'oxyde :

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = E\Psi \quad \text{De solution sinusoïdale : } \Psi_1(x) = A_1 e^{iKx} + B_1 e^{-iKx} \quad \text{avec } Kh = \sqrt{8mE}$$

- Dans la zone ($0 < x < a$) où a est la distance entre le site réactif A^+ (Fig. 2) et le haut de la barrière d'activation du site A^+ , d'énergie potentielle $V > E$, l'équation est :

$$\left[-\frac{\hbar^2}{8\pi m} \Delta + V(x) \right] \Psi(x) = E\Psi(x)$$

De solution réelle :

$$\Psi_2(x) = A_2 e^{Dx} + B_2 e^{-Dx} \quad \text{avec } D.h = \sqrt{8\pi m(V - E)}$$

En écrivant la continuité des fonctions Ψ_1 et Ψ_2 , de leur fonction dérivées à la frontière, on obtient les Amplitudes A_i et B_i qui permettent de calculer les probabilités de transfert.

Pour les particules possédant une énergie E ($E < V$) insuffisante, d'après la mécanique classique, pour franchir la barrière d'activation V d'oxydation, la probabilité P_0 de transfert par effet tunnel n'est pas nulle et est, Atkins (2005).

$$P_0(E/V) = \frac{1}{1 + \frac{(e^{Da} - e^{-Da})^2}{16 \frac{E}{V} \left(1 - \frac{E}{V}\right)}} \quad \text{avec } 0 < E/V < 1 \quad \text{et} \quad D.h = \sqrt{8\pi m(V - E)}$$

Pour une largeur a donnée, la probabilité P_0 est positive et augmente avec le rapport E/V .

En présence du champ magnétique, le potentiel électrique V_L de Lenz induit dans le disque tournant augmente l'énergie E de la particule de $|qV_L|$, l'équation de Schrödinger de la particule devient :

$$\frac{\hbar^2}{8\pi m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + [E_B + qV_L - V]\Psi = 0 \quad \text{En posant} \quad E_B = E + |qV_L|$$

$$P_B(E_B/V) = \frac{1}{1 + \frac{(e^{D'a} - e^{-D'a})^2}{16 \frac{E_B}{V} \left(1 - \frac{E_B}{V}\right)}} \quad \text{avec } 0 < E_B/V < 1 \quad \text{et} \quad D' \cdot \hbar = \sqrt{8\pi m (V - (E + |qV_L|))}$$

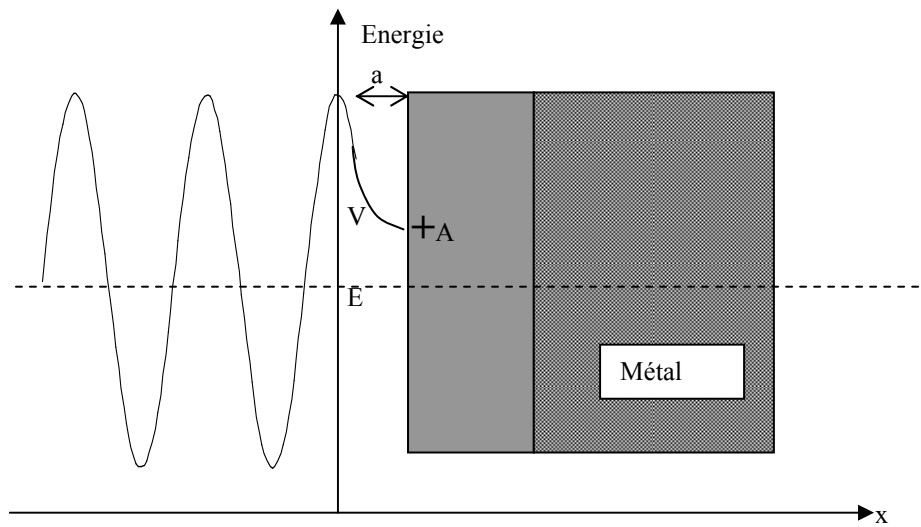


FIG. 2 – Equation du mouvement d'une charge qui diffuse suivant x de $x = 0$ à $x = a$ à travers une barrière de potentiel de largeur a et de potentiel $V > E$.

Ainsi, on voit que la probabilité P_B de transmission par effet tunnel augmente pour un tribocontact magnétisé par le potentiel induit de Lenz dans le disque en rotation dans le champ magnétique. L'application d'un champ magnétique active l'oxydation de la surface de contact par un accroissement du transfert des charges électriques à travers la couche d'oxyde dans la réaction électrochimique ayant lieu à l'interface oxyde/métal ou à l'interface air / oxyde.

3.4 Conservation du spin électronique

On note que la présence du champ magnétique favorise la formation des oxydes ferromagnétiques au dépend des deux autres oxydes non ferromagnétiques. Le système garde sa symétrie d'avant transformation chimique conformément au principe de conservation du spin électronique. Un état de spin $+(-)$ se transforme après oxydation en un spin $+(-)$. Les électrons 4s et 3d du fer Fe ($3d^6 4s^2$) ont des énergies similaires. La magnétite Fe_3O_4 de composition (Fe^{2+} , $2Fe^{3+}$, $4O^{2-}$) qui correspondent à l'enlèvement des trois électrons, les deux électrons 4s puis un électron 3d, doit son aimantation uniquement aux ions Fe^{2+} de moment magnétique $4\mu_B / ionFe^{2+}$. μ_B est le magnétron de Bohr. La maghémite $\gamma-Fe_2O_3$ ($2Fe^{3+}$,

$3d^{2+}$) est de moment magnétique $2x5\mu_B / ionFe^{3+}$. Sans champ magnétique, la population électronique $3d$ est équirépartie en spin (+) $3d \uparrow$ et en spin(-) $3d \downarrow$. L'application du champ magnétique augmente la population $3d \uparrow$, orientées parallèlement à la direction du champ, et diminue la population $3d \downarrow$.

La différence ΔN des deux populations responsable du magnétisme de l'acier :

$$\Delta N = N \uparrow - N \downarrow = N(1 - e^{-\frac{2\mu_B B}{kT}}) \approx N \frac{2\mu_B B}{kT} \text{ de moment magnétique :}$$

$$M = \Delta N \mu_B = N \left(\frac{2\mu_B B}{kT} \right) \mu_B \text{ englobe } \frac{\Delta N}{2,2} \text{ atomes de fer, car le moment magnétique résultant}$$

d'un atome de fer est de $2,22\mu_B/\text{atome}$. La conservation du moment magnétique conduit à une répartition du fer en $x\%$ atomes dans la magnétite et $(1-x)\%$ atomes dans la maghémite. $\frac{4}{5}x + 2\frac{5}{5}(1-x) = 2,22$, soit $x=76\%$.

4. CONCLUSION.

La présence d'un champ magnétique autour du contact glissant du couple d'acier ferromagnétique modifie considérablement son comportement tribologique avec une modification de la composition chimique de son troisième corps et par conséquent une diminution importante du taux d'usure.

Lors du frottement sans champ magnétique, la piste de contact sur le disque est de la couleur de l'acier rugueuse et sillonnée par usure abrasive. Les débris d'usure récupérés sont métalliques et de grandes dimensions.

Par contre, en présence du champ magnétique autour du tribocontact, la piste de contact est couverte des particules d'usure de couleur noire visibles à l'œil nu. Il y a une forte rétention des particules très fines et ferromagnétiques autour du pion durant le test. La piste de frottement commence à être recouverte d'une couche noire d'oxyde de fer puis devient totalement noire avec une accumulation continue des particules. La piste est moins rugueuse. Les essais effectués sous vide confirme l'activation de l'oxydation par le champ magnétique

L'analyse des phases par diffraction des rayons X en $\theta - 2\theta$ révèle la présence des deux oxydes, la maghémite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ et la magnétite Fe_3O_4 dans les débris du contact magnétisé et leur absence complète dans les débris non magnétisés. Ce résultat prouve l'activation par le champ magnétique de l'oxydation du contact.

La modélisation de l'effet tunnel des charges électriques à travers la couche d'oxyde du contact magnétisé permet d'expliquer cette activation de l'oxydation des surfaces de contact.

5. RÉFÉRENCES

- Muju, M., and Ghosh, A. 1980 Effect of a magnetic field on the wear of cutting tools, *Wear* **58**, 137-145.
- Hiratsuka, K. and T. Sasada, T. 1987 Wear of metals in a magnetic field, *Wear*, 251-256.
- Chin, K. J., Zaïdi, H. & Mathia, T. 2005 Oxide film in magnetized sliding steel/steel contact analysis of the contact stress field and film failure mode. *J. Wear* **259**, 477-481.
- Atkins, P-W. & De Paula, J. 2005 Chimie Physique (ed. De boeck). Pp 988-989, Bruxelles.