

ANISOTROPIE DE FROTTEMENT DE FILMS MINCES DE MOLYBDENE DEPOSES PAR GLAD

G. B. Rodrigues¹, P. Boulet², N. Martin¹, F. Amiot¹, G. Colas¹

¹Université Marie et Louis Pasteur, SUPMICROTECH, CNRS, Institut FEMTO-ST, F-25000, Besançon, France

²Université de Lorraine, Institut Jean Lamour, Nancy, France

MOTS CLES

Essais de rayure, Anisotropie, Films minces.

INTRODUCTION

Parmi les nombreux phénomènes qui se produisent lorsque deux surfaces sont en contact, l'anisotropie de frottement fait l'objet d'une attention croissante. Cette anisotropie se manifeste lorsque les coefficients de frottement varient en fonction de la direction ou de l'orientation du glissement [1]. Elle est fréquemment observée sur des surfaces biologiques, conséquence de leur architecture intrinsèque. Dernièrement, des techniques de texturation de surface ont été utilisées pour reproduire ces architectures, permettant ainsi de conférer une anisotropie de frottement à des matériaux initialement isotropes. Cependant, une technique de déposition, le GLancing Angle Deposition (GLAD), s'est révélée particulièrement efficace pour produire des films présentant également des nanostructures.

Récemment, des différents types d'anisotropie de frottement sur des films GLAD de tungstène ont été observés [2]. Cette anisotropie est fortement liée à la morphologie, qui évolue avec l'angle de déposition et influence significativement la déformation plastique des films. Dans ce contexte, ce travail explore la possibilité de reproduire cette anisotropie de frottement avec du molybdène (Mo).

METHODE EXPERIMENTALE

Des films de Mo (520 ± 50 nm d'épaisseur) ont été déposés sur un substrat de silicium à des angles de déposition (α) de 0° à 85° . Leur morphologie et leur cristallographie ont été caractérisées (MEB, GIXRD et figures de pôles). Des essais de rayure à un seul passage ont ensuite été réalisés avec un micro scratch et un indenteur Rockwell (rayon de $100 \mu\text{m}$), sous quatre forces normales (F_N).

L'anisotropie a été évaluée en définissant les directions de rayures (ϕ) : $\phi = 0^\circ$ quand l'indenteur frotte dans le sens d'inclinaison du film et $\phi = 180^\circ$ à la direction opposée. Des six autres angles ont été définis par pas de 45° en tournant dans le sens anti-horaire (Figure 1). Chaque condition a été testée 3 fois, et la loi de Coulomb vérifiée. Un modèle linéaire basé sur Zmitrowicz [3] a permis d'ajuster une courbe aux coefficients de frottement ($\mu(\phi)$), d'identifier et quantifier l'anisotropie. Une analyse de propagation des incertitudes (95 % de confiance) et des observations post-rayure ont complété l'étude.

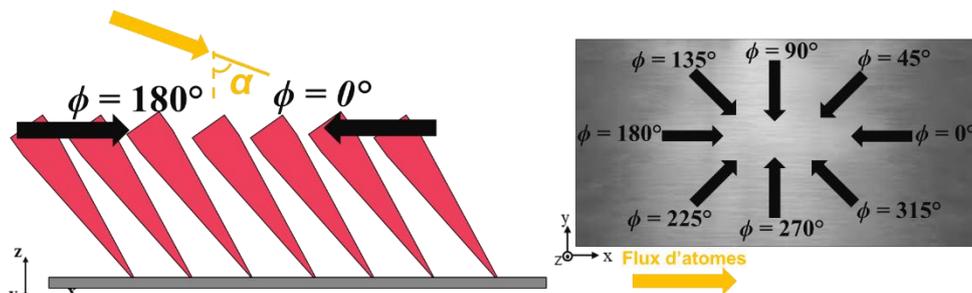


Figure 1 : Un schéma illustre l'angle α , orientant la croissance des films vers le flux d'atomes. Cette inclinaison sert de référence pour définir $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 180^\circ$, tandis que les six autres directions de rayure.

RESULTATS

Sept films ont présenté une réponse en frottement conforme à la loi de Coulomb en présentant des valeurs de μ considérablement faibles (0.02 – 0.04). Ces films sont répartis en quatre groupes :

- i) $\alpha = 0^\circ$: Isotrope avec μ similaire pour toutes les valeurs de ϕ (Figure 2(a));
- ii) $\alpha = 30^\circ$: Subtile anisotropie non-centrosymétrique [3] avec des valeurs de μ différentes pour les directions $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 180^\circ$ (Figure 2(b));
- iii) $\alpha = 50^\circ, 60^\circ$ et 80° : Orthotrope (différence significative entre les valeurs de μ pour les directions $\phi = 90^\circ$ et $\phi = 270^\circ$) avec une subtile non-centrosymétrie ;
- iv) $\alpha = 70^\circ$ et 85° : Orthotrope.

Comme dans l'étude précédente [2], l'anisotropie peut être liée à la morphologie et aux modes de déformation. Pour les films de Mo étudiés, à partir de $\alpha = 50^\circ$, les colonnes deviennent elliptiques perpendiculairement au flux d'atomes ($\phi = 90^\circ$ et $\phi = 270^\circ$), limitant la déformation plastique et augmentant ainsi les valeurs de μ . La Figure 2(c) montre le résultat pour le film déposé à $\alpha = 70^\circ$.

Pendant, le film déposé à $\alpha = 40^\circ$ présente une réponse non-coulombien. Une forte asymétrie est observée autour de l'axe $90^\circ/270^\circ$, avec des valeurs de μ distinctes selon les directions opposées ($\phi = 0^\circ/180^\circ$, $\phi = 45^\circ/315^\circ$ et $\phi = 135^\circ/225^\circ$), comme observé dans la Figure 2(d). Aucune corrélation avec la morphologie n'a été identifiée, mais un vieillissement significatif influence le frottement et l'anisotropie, probablement d'origine cristallographique, comme le suggèrent les figures de pôles réalisées à différents temps après la déposition du film.

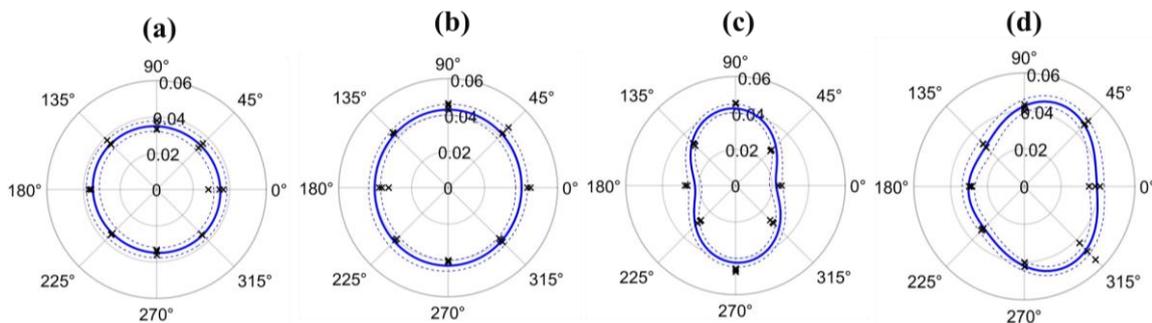


Figure 2 : Résultats de coefficient de frottement (μ) en fonction de la direction de rayure (ϕ) pour le film déposés à (a) $\alpha = 0^\circ$, (b) $\alpha = 30^\circ$, (c) $\alpha = 70^\circ$ et (d) $\alpha = 40^\circ$. Les lignes pointillées indiquent l'intervalle d'incertitude [4].

CONCLUSION

Des films de molybdènes déposés par GLAD montrent une réponse en frottement qui suit la loi de Coulomb et différentes anisotropies. Elles sont fortement dépendantes de la morphologie des films, sauf pour $\alpha = 40^\circ$. Ce film a un comportement non-coulombien et une forte asymétrie autour de l'axe $90^\circ/270^\circ$. Il subit également un vieillissement notable, probablement lié à une évolution de sa cristallographie.

Références

- [1] Tramsen, H. T. et al. (2018), Inversion of friction anisotropy in a bio-inspired asymmetrically structured surface, *J. R. Soc. Interf.*, 15 (138), 20170629. DOI: 10.1098/rsif.2017.0629.
- [2] Rodrigues, G. B., Martin, N., Amiot, F., Colas, G. (2025), Friction anisotropy dependence on morphology of GLAD W films. *Trib. Int.*, 206, 110556. DOI: 10.1016/j.triboint.2025.110556.
- [3] Zmitrowicz A. (1981), A theoretical model of anisotropic dry friction, *Wear*, 73 (1), 9–39. DOI: 10.1016/0043-1648(81)90207-6.
- [4] Rodrigues, G. B. (2024). Friction anisotropy of metallic thin films deposited by Glancing Angle Deposition (GLAD) : Morphological and crystallographic aspects. [thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté]. NNT : 2024UBFCD065.