

Microstructure et Détermination de la température de contact d'un dépôt en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%TiO}_2$ obtenu par projection thermique.

Rassim Younes¹, Mohand Amokrane Bradai¹, Nadia Aderghal², Abdelhamid Sadeddine¹, Youcef Mouadji³ et Abderrahim Benabbas⁴

¹Laboratoire de Mécanique, Matériaux et énergétique (L2ME). Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000 Bejaia, Algérie. E-mail : rassimyounes@yahoo.fr

²Département de Génie Mécanique, Université de Jijel, BP 98 Ouled Aissa Jijel 18000-Algérie

³Ecole Nationale Polytechnique de Constantine, Département de génie mécanique, Université de Constantine 3, 25000 Constantine, Algérie

⁴Laboratoire Procédés pour Matériaux, Energie, Eau et Environnement (LPM3E). Faculté des sciences et de la technologie. Université de Bouira, 10000 Bouira, Algérie.

Résumé - Ce travail porte sur la caractérisation microstructurale, structurale et thermique d'un dépôt en céramique type $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13) déposé sur un acier à bas carbone non allié d'usage courant de nuance E335 par la technique de projection thermique à flamme-fil. Les microstructures et l'identification des phases du fil et du dépôt sont obtenues en utilisant le microscope électronique à balayage (MEB) et la diffraction X (DRX). Des mesures de micro duretés, sous une charge de 200g, ont été également réalisées sur la surface de ce dépôt. Les essais thermiques ont été réalisés sur un tribomètre de type pion/disque à différentes charges (5N, 10, 15, 20 et 30N) pendant une durée de 30 minutes en vue de déterminer la température de contact. Des profils de rugosités ont été aussi relevés avant et après chaque essai. Les observations microstructurales ont montré que les dépôts $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13) présentent une morphologie lamellaire homogène, plus dense et plus compacte avec la présence de quelques porosités. Le spectre de DRX du fil avant la projection montre la présence d'une phase majoritaire $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$ de structure rhomboédrique, une phase secondaire Al_2TiO_5 de structure orthorhombique avec quelques traces de TiO_2 (rutile) de structure tétragonale. Le spectre DRX du dépôt issu du fil a révélé la disparition de TiO_2 et la formation d'une nouvelle phase métastable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\gamma$ de structure cubique. Les résultats tribologiques thermique ont montré que la pression de contact appliquée influe sur la variation de la température en fonction du temps et que celui-ci décroît avec l'augmentation de l'effort normal de contact.

Mots Clés : Projection thermique, Température, Dépôt.

Nomenclature

V : vitesse de glissement [rd/s];

C_p : Capacité calorifique [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

ρ : masse volumique [kg/m^3]

$T_{p,n,e,w,s}$: Température à différent point ; pion, nord, est, ouest, sud.

K : Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

K_p : Conductivité thermique du pion [W/m.K]

K_d : Conductivité thermique du disque [W/m.K]

Q : Flux de chaleur [W]

H : Coefficient de convection [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

1. Introduction

La projection thermique des dépôts en céramique est une méthode importante de protéger les diverses pièces métalliques, qui sont exposées aux environnements très durs. Elle consiste à introduire des particules solides (quelques dizaines de mm de diamètre) dans une flamme ou un jet de plasma afin de les y accélérer et de les fondre avant qu'elles ne viennent s'écraser sur le substrat où elles forment un dépôt. Ce dernier est en fait constitué par un empilement de lamelles écrasées [1–3]. Les dépôts en céramique durs sont des candidats très bons pour des applications Thermique [4-10] anti-usure et anticorrosion [11-15]. La projection de l'alumine (Al_2O_3) ou de titanate d'aluminium ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$) offrent le potentiel pour des améliorations dans les propriétés mécaniques en fonction des améliorations des propriétés physiques résultant des caractéristiques de la microstructure [16-18]. La diversité des revêtements utilisés pour les pièces usées continue de faire l'objet d'une recherche intense sur leur caractérisation tribologique [19–24]. L'usage de la projection thermique a d'abord été limité à des matériaux tréfilables et conducteurs électriques. Mais récemment ont été développés des matériaux sous forme de fils dit fourrés constitués d'une gaine métallique tréfilable et conductrice, remplie de poudres d'alliages renforcées, éventuellement en particules céramiques. Ces fils fourrés autorisent la réalisation par le procédé flamme-fil de revêtements de superalliages et de cermets afin d'améliorer les propriétés tribologiques [25]. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement tribologique du dépôt en céramique type $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13) déposé sur un acier de construction mécanique de nuance E335 par la technique de projection thermique flamme-fil. Les microstructures et l'identification des phases du fil et du dépôt sont obtenues en utilisant le microscope électronique à balayage (MEB), la microanalyse aux rayons X (EDAX) et la diffraction X (DRX). Des mesures de micro duretés, sous une charge de 200g, ont été également réalisées sur la surface de ce dépôt. Les essais tribologiques ont été réalisés à sec sur un tribomètre de type pion/disque selon deux couples de contact:

- Couple 1 : Pion revêtu par un dépôt en $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13)/ disque en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (AZ-25).
- Couple 2 : Pion revêtu par un dépôt en $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13)/ disque en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-3).

2. Les procédures expérimentales utilisées

2.1. Matériaux utilisés

Le substrat utilisé, dans cette étude, est un acier de nuance E335 relatif à un acier à bas carbone non allié d'usage courant. Le substrat est de forme cylindrique de diamètre 10 mm et de longueur 30 mm. La teneur en pourcentage massique des éléments constituant le substrat, obtenu à l'aide d'une analyse par fluorescence aux rayons X, est représentée dans le tableau 1.

Tableau 1: Analyse du substrat par la fluorescence des rayons X

| E335 | Fe | Ni | C | Mn | Cu | Si |
|------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|
| | Bal | <0,03 | 0,1 | 0,231 | 0,119 | 0,044 |

Dans notre travail, nous avons déposé un alliage d'alumine et oxyde de titane (AT-13) d'épaisseurs allant de 0,8 à 1 mm sous forme de fil de diamètre 4,75 mm. Ce dépôt a été projeté sur les surfaces des échantillons par le pistolet à flamme-fil. Les compositions chimiques, du matériau d'apport $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13) et les matériaux utilisés comme disques de contact dans les essais tribologiques, sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2: Compositions chimiques des matériaux utilisés

| Materials | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | ZrO ₂ | Others |
|----------------|--------------------------------|------------------|------------------|--------|
| (AT-13) | 87 | 12.7 | / | 0,3 |
| (AZ-25) Disc 1 | 75 | / | 24,5 | 0,5 |
| (AT-3) Disc 2 | 97 | 2,8 | / | 0,2 |

2.2. Le procédé et les paramètres de projection.

Le dispositif de projection par flamme utilisé pour élaborer les dépôts à partir de fils est constitué d'un pistolet Master-Jet 2 (cf. Figure 1), pourvu d'un moteur électrique à basse vitesse (40 cm/min) pour l'entraînement du fil. Un système de contrôle des gaz, composé de débitmètres à flotteur pour régler le débit d'oxygène et d'acétylène et des manomètres régulant la pression des gaz de la flamme, d'air et d'un support échantillon. Les paramètres de projection utilisés sont donnés dans le tableau 3.

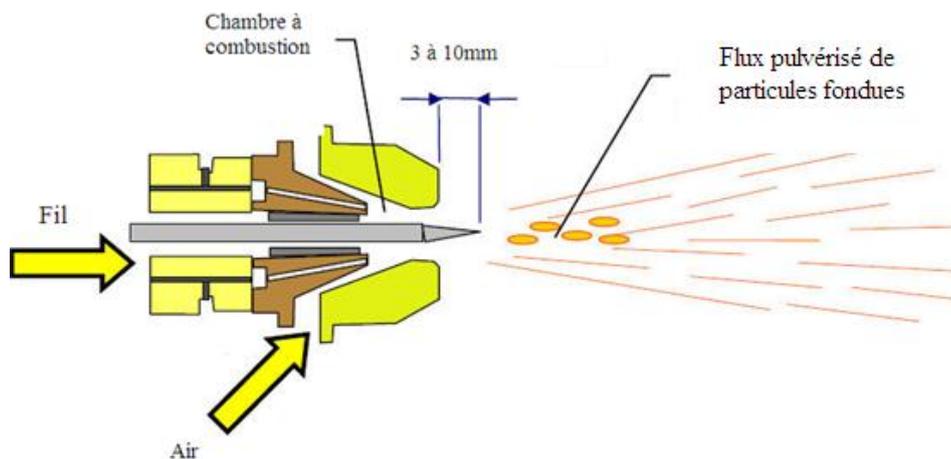


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil.

Tableau 3 : Paramètres de projection.

| Paramètres de projection | Tielite |
|-----------------------------|-----------|
| Gaz | acétylène |
| Vitesse du fil (cm/min) | 60 |
| Débit du fil ((Kg/h) | 1,25 |
| Pression air (bars) | 4,5 |
| Pression gaz (bars) | 4 |
| Pression oxygène (bars) | 1,2 |
| Distance de projection (mm) | 70 à 80 |
| Angle de projection | 90° |

2.3. Méthodes de caractérisation des dépôts

Les observations microstructurales du fil et des dépôts en $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ont été réalisées au MEB (de marque japonaise JEOL JSM-6360LV). Nos échantillons ont été coupés selon des dimensions recommandées. Les diagrammes de diffraction RX ont été enregistrés à l'aide d'un diffractomètre de type X'PERT PRO MRD de chez PANalytical, équipé d'un tube RX à anode en cuivre. La forte présence de défauts dans ce type de matériaux engendre un bruit de fond important ; pour améliorer la statistique de comptage et augmenter le rapport pics/fond continu, un temps d'acquisition de 40 s par pas angulaire de $0,04^\circ$ a été utilisé sur l'intervalle s'étalant entre 35° et 100° (20).

Les mesures de micro dureté sont faites sur des surfaces polies avec un pénétrateur Vickers en appliquant une charge de 200 g. L'appareillage utilisé est un microduromètre Zeiss. L'empreinte est produite sur l'éprouvette par un diamant pyramidal avec la surface de base carrée et angle dièdre de 136° , avec une force et une durée d'action déterminée.

Les essais de frottement ont été effectués sur les dépôts en utilisant un tribomètre type TE 91 dans une configuration «pion-disque» en fonction de la charge pendant une durée de 30 minutes. Cet essai tribométrique permet d'étudier la distribution de la température générée au contact pour des couples de matériaux donnés. Son principe consiste à appliquer un thermocouple dans le pion immobile dans le plan horizontal en contact avec la face d'un disque en rotation suivant l'axe vertical (Figure 2). Le pion est le substrat revêtu du dépôt, Les disques en céramique sont des cylindres épaulés, dont le diamètre de la surface frottante est de 3 mm. Ils sont animés d'un mouvement de rotation à vitesse constante 0,5 m/s. Une charge statique normale N est appliquée sur celui-ci. Les techniques de mesure de températures consistent à implanter des thermocouples noyés dans des trous borgnes, sous la surface de frottement des échantillons. La température enregistrée dépend de la distance d'implantation du thermocouple. Ce type de montage donne de bonnes indications pour l'évaluation des températures moyennes sous la surface de frottement mais est limité quant à l'évaluation des températures maximales atteintes en surface. Cette technique a été utilisée pour évaluer les températures de surface de différents couples en contact glissant. Les essais tribologiques ont été réalisés selon deux couples de contact:

- Couple 1 : Pion revêtu par un dépôt en $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13)/ disque en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (AZ-25).
- Couple 2 : Pion revêtu par un dépôt en $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13)/ disque en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-3).

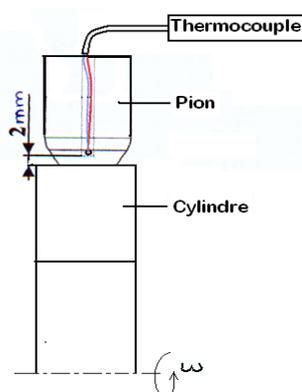


Figure 2. Méthode expérimentale de mesure de la température

Dans le but d'approche la température de contact des surfaces on discrétise la distance du millimètre du en un domaine de calcul suivant un maillage non uniforme dans les directions horizontale et verticale. Le maillage est raffiné davantage dans la zone de contact pour donner plus

de précision. Dans cette région, on a opté pour une forme du modèle théorique qui s'approche du modèle géométrique, en utilisant la technique d'escalier (Figure 2).

3. Résultats et discussions

3.1. Analyses microstructurales au MEB

La micrographie présentée dans la figure 3 illustre la morphologie du fil en AT-13. Ce dernier présente une microstructure de particules micrométriques, de taille différente, avec des plans de fracture et des pores sur leur surface, typiques de matériaux soumis à un processus de fusion, puis par la suite à une réduction de la taille par broyage.

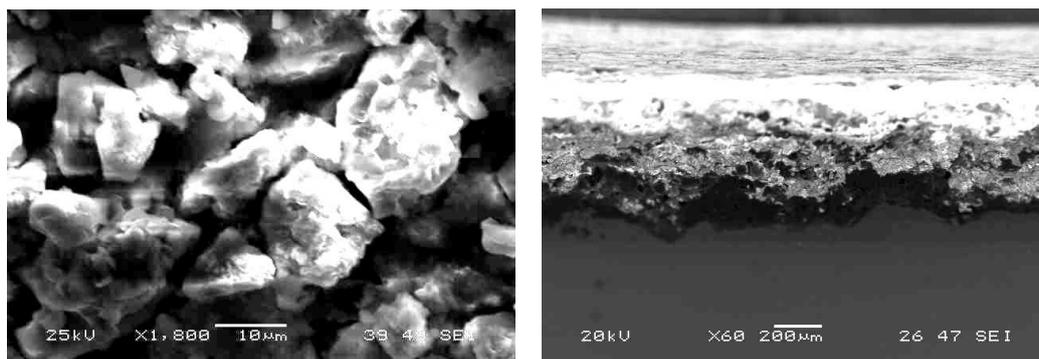


Figure 3: Micrographie MEB $Al_2O_3-TiO_2$ (AT-13). a): Fil, b): Dépôt.

Les observations au MEB du dépôt issu du fil d'alliage $Al_2O_3-13\%TiO_2$ (AT-13) élaboré par projection flamme oxyacétylénique montrent une microstructure dense, compacte et complexe formée de plusieurs phases avec la présence en plus de porosités, des particules non fondues (Figure 3). On remarque également que ce dépôt a une faible porosité, ceci peut être associé à l'effet de la plus grande vitesse qu'atteignent en vol les particules issues du fil, du fait de l'utilisation d'un jet d'air de pression supérieure et donc une vitesse d'impact supérieure, entraînant un meilleur étalement.

3.2. Analyse par diffraction X (DRX)

La Figure 4 présente les spectres de diffraction aux rayons X relatifs au fil en alliage $Al_2O_3-TiO_2$ (AT-13) et de son dépôt élaboré par projection flamme- fil.

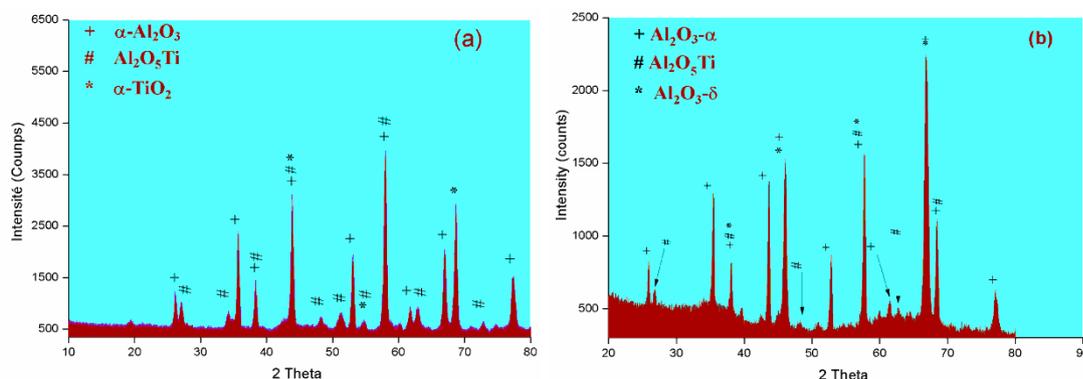


Figure 4 : spectres de diffraction X du fil $Al_2O_3-TiO_2$ (AT-13). a) : Fil, b) : dépôt.

Le spectre de diffraction X du fil $Al_2O_3-TiO_2$ (AT-13) a révélé la présence de trois phases: une phase majoritaire $Al_2O_3-\alpha$ de structure rhomboédrique, une

phase secondaire Al_2TiO_5 de structure orthorhombique avec quelques traces de TiO_2 (rutile) de structure tétragonale. En effet, l'affinement des paramètres cristallins des trois phases présentes dans le fil $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13), en tenant compte du décalage du spectre lié à la position de l'échantillon, aboutit aux valeurs suivantes représentées dans le tableau 4. Le spectre DRX du dépôt issu du fil $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13), en plus de la présence de la phase majoritaire $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$ de structure rhomboédrique, et d'une phase secondaire Al_2TiO_5 de structure orthorhombique, a révélé la disparition de la phase rutile TiO_2 qui s'est substituée par la formation d'une nouvelle phase métastable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\gamma$ de structure cubique. Le paramètre cristallin affiné de cette nouvelle phase cubique est de $a = 7,9060 \text{ \AA}$. Le temps d'élaboration de ce dépôt issu du fil $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ peut être insuffisant pour former des oxydes de titanes ou d'autres phases qui contiendraient des atomes de Ti, et en conséquence les atomes de Ti sont dissouts dans la phase $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\gamma$ [26-28].

3.3. Mesures de micro duretés

Les micro-duretés sont réalisées sur le dépôt en alliage $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13), le substrat en acier E335 ainsi que les deux disques antagonistes formant les couples de contact ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-3) et $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (AZ-25)) par indentation Vickers avec une charge de 200g pendant 30 secondes. Pour chaque échantillon, l'écart type moyen calculé est basé sur la moyenne de 10 mesures. Ces essais ont révélé que la microdureté du revêtement $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13) est pratiquement trois fois plus dur que celle du disque 1 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (AZ-25) (environ $1326 \pm 66 \text{ HV}_{0,2}$ contre $563 \pm 25 \text{ HV}_{0,2}$). Par contre, elle est légèrement proche de celle du disque 2 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-3) (environ $1326 \pm 66 \text{ HV}_{0,2}$ contre $1280 \pm 64 \text{ HV}_{0,2}$).

3.4. Mesures de la température de contact

Les mesures de l'évolution de la température dans les pions instrumentés de thermocouple ont permis d'avoir une estimation du flux thermique dans le pion notamment la distribution du champ de température dans tout le domaine géométrique et particulièrement au point de contact. La figure 5 illustre la variation de la température de contact en fonction de la charge.

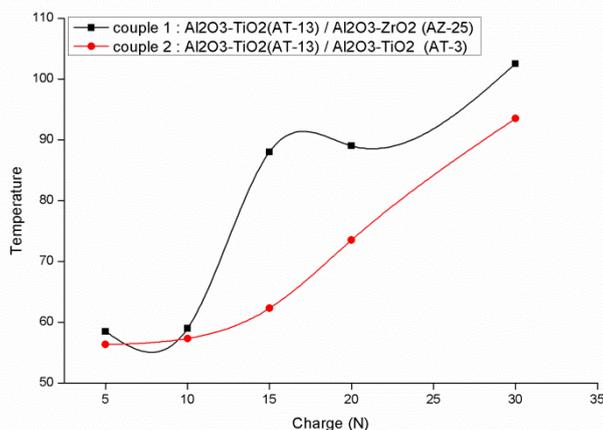


Figure 5: Variation de la température de contact en fonction de la charge.

On note que l'allure des deux courbes est relativement identique. Les écarts sont très faibles. Il est important aussi de rappeler que ponctuellement nous pouvons avoir des températures flash à l'échelle des aspérités, qui dépassent largement les températures calculées.

La première partie de la courbe de (5 à 10N) correspond à la phase d'accommodation des surfaces du disque et du pion lorsque le contact s'établit et au-delà de 10N, la température de contact augmente progressivement jusqu'à une valeur de 110°C pour les deux couples. Ceci est dû au contact de frottement qui génère une enthalpie locale. En général, pour toutes les conditions

d'essais effectuées, la température de contact des couples étudiés a la même allure mais les valeurs diffèrent. Ceci peut s'expliquer par les différentes formations et modifications microstructurales au cours de l'essai. Cependant, il est intéressant de mettre l'accent sur la variation de cette température en fonction du temps pour les charges de 5N et 30N (Figure 6).

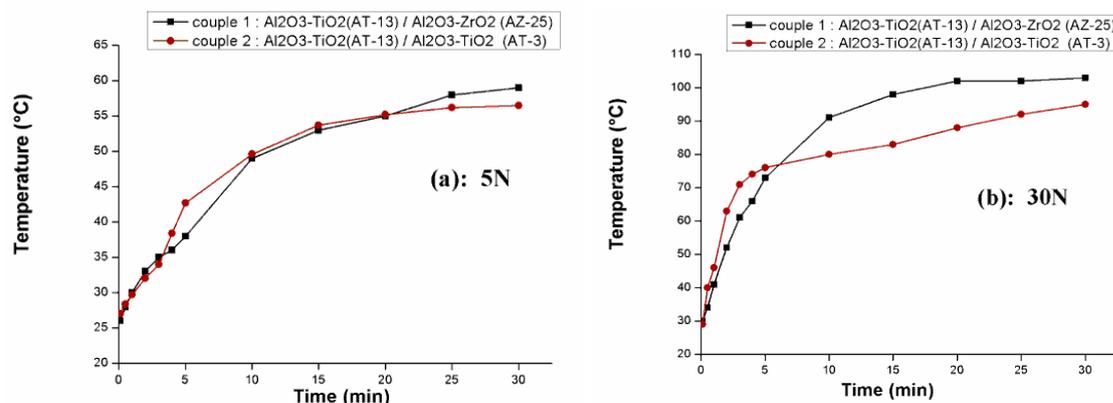


Figure 6: Variation de la température de contact en fonction du temps

a) : 5N, (a) : 30N.

Les températures mesurées se stabilisent après 10 minutes. Ce temps correspondra probablement à la stabilisation du coefficient de frottement. La température obtenue est considérée comme une température moyenne de contact au régime établi. Cette dernière est maximale au point de contact. Plus on s'éloigne (soit en profondeur, soit latéralement), la température diminue de plus en plus et atteint son minimum sur les frontières extérieures. La température mesurée pour le couple 1 est nettement supérieure à celle du couple 2 sous une charge de 5N. Ceci est dû à la différence de conductivité thermique de la zircone (renforçant la matrice du disque 1) qui est supérieure à celle du titane (renforçant la matrice du disque 2). Par contre, sous une charge de 30N, on remarque que les deux couples présentent les mêmes températures de contact avec un écart presque constant. C'est la raison pour laquelle, on peut dire que la température est due au contact des surfaces lors de la période de transition. La température au contact est liée à la contrainte de cisaillement qu'entraînera l'augmentation du flux de chaleur. De ces résultats, on peut dire que la température mesurée augmente avec l'augmentation de la charge et converge avec le temps de contact.

4. Conclusion

Cette étude visait à développer par projection thermique à flamme-fil des revêtements à base de céramiques type $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13). De tels dépôts, présentant un fort potentiel pour des applications industrielles de haute technologie. Les essais tribologiques ont été réalisés en vue d'évaluer la température de contact en fonction des différentes charges normales appliquées et en fonction du temps.

- Les observations microstructurales ont montré que les dépôts $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13) présentent une morphologie lamellaire homogène, plus dense et plus compacte avec la présence de quelques porosités.

- Le spectre DRX du dépôt issu du fil $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13), en plus de la présence de la phase majoritaire $\text{Al}_2\text{O}_3 \alpha$ de structure rhomboédrique et d'une phase secondaire Al_2TiO_5 de structure orthorhombique, a révélé la disparition de la phase rutil TiO_2 qui s'est substituée par la formation d'une nouvelle phase métastable $\text{Al}_2\text{O}_5 \gamma$ de structure cubique.

- Les essais de microdureté ont révélé que le revêtement $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-13) est pratiquement trois fois plus dur que le disque 1 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ (AZ-25) et de dureté proche du disque 2 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (AT-3).
- Les résultats thermiques ont montré que la pression de contact appliquée influe sur la variation de la température de contact en fonction du temps et que celle-ci décroît avec l'augmentation de l'effort normal de contact.

Références

1. S. Brossard, P.R. Munroe, A.T.T. Tran and M.M. Hyland, Study of the splat formation for plasma sprayed NiCr on aluminum substrate as a function of substrate condition, *Surf. Coat. Technol.*, 204 (2010) 2647-2656.
2. L. Wang, Y. Wang, X.G. Sun, J.Q. He, Z.Y. Pan, Y. Zhou and P.L. Wu, Mater, [Influence of pores on the thermal insulation behavior of thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spray](#) , *Mater. Des.*, 32 (2011) 36-47.
3. K. Alamara, S.S. Samandari, P.R. Stoddart and C.C. Berndt, Effect of substrate temperature on the splat formation of flame sprayed polypropylene, *Surf. Coat. Technol.*, 206 (2011) 1180-1187.
4. N. Laraqi, Phénomène de constriction thermique dans les contacts glissants, *Int.J.Heat mass Transfer*, 38 (1996) 3717-3724.
5. Y. S. Muzychka and M.M.Yovanovich, Thermal resistance models for non-circular moving heat sources on a half space. *ASME, Journal of Heat Transfer*, 123 (2001) 624–632.
6. J. F. Archard, The temperature of rubbing surfaces, *Wear*, 2 (1959) 438-455.
- A. A. Yevtushenko, E. G. Ivanik and O. M. Ukhanska, Transient temperature of local moving areas of sliding contact, *Tribology International*, 30 (1997) 209-214.
7. T. Bouache, Comportement thermique et caractérisation des échanges interfaciaux d'un frein à disque par approches théorique et expérimentale, Thèse de Doctorat, Université de Paris X, (2006).
8. J. Denape, and N. Laraqi, Aspect thermique du frottement: mise en évidence expérimentale et éléments de modélisation, *Méca. Ind*, 1 (2000) 563-579.
9. J.J. Vullierme, J. J. Lagarde and H. Cordier, Etude de la résistance de contact entre deux matériaux en frottement-Influence de la vitesse relative de glissement, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22 (1979) 1209-1219.
10. M. Wang and L.S. Leon, Effects of the powder manufacturing method on microstructure and wear performance of plasma sprayed alumina–titania coatings, *Surf. Coat. Technol*, 202 (2007) 34–44.
- A. Keyvani, Microstructural stability oxidation and hot corrosion resistance of nanostructured $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ composite compared to conventional YSZ TBC coatings; *J. Alloy.Comp.*, 623 (2015) 229-237.
11. M. Vicent, E. Bannier, P. Carpio, E. Rayón, R. Benavente, M.D. Salvador, and E. Sánchez, Effect of the initial particle size distribution on the properties of suspension plasma sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.010>
- A. Rico, J. Rodriguez, E. Otero, P. Zeng and W.M. Rainforth, Wear behaviour of nanostructured alumina–titania coatings deposited by atmospheric plasma spray , *Wear.*, 267 (2009) 1191.
12. Y. Yang, Y. Wang, W. Tian, D.R. Yan, J.-X. Zhang and L. Wang, Influence of composite powders microstructure on the microstructure and properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ coatings fabricated by plasma spraying. *Mater. Des.*, 65 (2015) 814-822.
13. R.S. Lima, B.R. Marple, K.A. Khor, H. Li and P. Cheang, HVOF spraying of nanostructured hydroxyapatite for biomedical applications, *Mater. Sc. Eng: A.*, 396 (2005) 181-187.

14. V. P. Singh, A. Sil, R. Jayaganthan, A study on sliding and erosive wear behaviour of atmospheric plasma sprayed conventional and nanostructured alumina coatings; *Mater. Des.*, 32 (2011) 584–591.
15. V. Bolleddu, V. Racherla and P.P. Bandyopadhyay, Microstructural and tribological characterization of air plasma sprayed nanostructured alumina–titania coatings deposited with nitrogen and argon as primary plasma gases; *Mater. Des.*, 59 (2014) 252-263.
16. B. Torres, M.A. Garrido, A. Rico, P. Rodrigo, M. Campo and J. Rams, Wear behaviour of thermal spray Al/SiCp coatings, *Wear.*, 268 (2010) 828-836 .
17. M.H. Enayati, F. Karimzadeh, M. Jafari, A. Markazi and A. Tahvilian, Microstructural and mechanical characterizations of a novel HVOF-sprayed WC-Co coating deposited from electroless Ni–P coated WC-12Co powders, *Mater. Sc.Eng : A.*, 578 (2013) 46-53.
18. S. Devaraj, S. Sankaran and R. Kumar : Influence of spark plasma sintering temperature on the densification, microstructure and mechanical properties of Al-4.5 wt.%Cu alloy , *Acta.Metall. Sin*, 26 (2013) 761-771.
19. R.J.K. Wood, Tribology of thermal sprayed WC–Co coatings, *Int. J. Refract. Metal. Hard. Mater.*, 28 2010 82-94.
20. M. A. Farrokhzad and T. I. Khan, High Temperature Oxidation of Nickel-Based Cermet Coatings Composed of Al₂O₃ and TiO₂ Nanosized Particles, *Oxid. Metal.*, 81 (2014) 267-285.
21. M. Priest, Optimisation of piston assembly tribology for automotive applications, *Tribol. Ser.*, 41 (2003) 739-748.
22. S. Nourouzi, “Contribution à l’étude du procédé arc-fil on de dépôts métallique durs résistant a l’usure abrasive,” Ph.D. Thesis , Limoges University, France, 2004.
23. Gaard, P. Krakhmalev, J. Bergström, J.H. Grytzelius, H.M. Zhang, Influence of tool steel microstructure on origin of galling initiation and wear mechanisms under dry sliding against a carbon steel sheet, *Wear*, 267 (2009) 387-393.
24. M. Wang and L. Shaw: Effects of the powder manufacturing method on microstructure and wear performance of plasma sprayed alumina-titania coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 202 (2007) 34-44.
25. D. Goberman, Y. H. Sohn, L. Shaw, E. Jordan and M. Gell, Microstructure Development of Al₂O₃ - 13wt.% TiO₂ plasma sprayed coatings derived from nanocrystalline powders, *Acta Material.*, 5 (2002) 1141-1152.