

Propriétés structurales et mécaniques des dépôts à base Nickel projetés thermiquement par le procédé à flamme.

Mohand Amokrane Bradai¹, Rassim Younes¹, Abdelhamid Sadeddine¹,
Youcef Mouadji², et Abderrahim Benabbas³

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

² Ecole Nationale Polytechnique de Constantine, Département de génie mécanique, Université de Constantine 3, 25000 Constantine, Algérie

³ Laboratoire Procédés pour Matériaux, Energie, Eau et Environnement LPM3E. Faculté des sciences et de la technologie. Université de Bouira, 10000 Bouira, Algérie

Résumé - L'objet de notre travail est de déposer des revêtements métalliques, sous forme de poudres à base de Ni. Ces revêtements ont subi des post-traitements à différentes températures 400°C, 600°C et 800°C en vue d'homogénéiser ces derniers et permettre d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques. Des mesures de micro duretés, sous une charge de 200g, ont été également réalisées sur la surface des revêtements. Les essais d'usure ont été réalisés à sec dans une configuration pion-disque à différentes charges avec deux vitesses de glissement de 0,5 m/s et 1m/s en fonction du temps. L'analyse structurale par la DRX de la poudre en alliage Nickel a révélé la présence d'une seule phase qui est une solution solide CFC (Ni, Al, Mo) comme phase majoritaire. Durant la projection, d'autres phases ont été formées pour les dépôts non traités et traités thermiquement à 400°C, 600°C et 800°C. Les essais de micro duretés ont révélé que le revêtement traité à 600°C est plus dur que celui non traité et traités à 400°C et 800°C. Les résultats d'usure ont révélé que le post-traitement à 600°C améliore la tenue à l'usure.

Mot-clé: Projection thermique, dépôts, DRX, usure.

5. Introduction

Dans la course actuelle aux procédés ayant le meilleur rapport qualité prix, les dépôts épais ont désormais un rôle clef parmi les nombreux candidats en lice. Afin d'améliorer les caractéristiques des dépôts et leur applicabilité dans les conditions extrêmes, les dépôts à base de Ni [1-4] de propriétés spécifiques ont été développés. Parallèlement, la progression des connaissances sur les matériaux ainsi que sur les procédés de fabrication des revêtements est actuellement très rapide. Parmi les procédés connus, la projection thermique est sans contestation l'une des techniques les plus appréciées [5-8]. La qualité fondamentale d'une surface fonctionnelle repose sur une meilleure tenue à l'usure. De ce fait, la présence d'un revêtement en surface d'une pièce doit présenter une bonne résistance à l'usure en cours de service. La diversité des revêtements utilisés pour les pièces usées continue de faire l'objet d'une recherche intense sur leur caractérisation tribologique [9-14].

La projection à flamme fait partie de la projection thermique qui regroupe un ensemble de procédés dans lesquels des matériaux sous forme pulvérulente (poudres de taille de l'ordre de 100 µm, environ) sont déposés dans un état fondu ou semi-fondu sur des substrats préalablement préparés.

L'objet de notre travail est de déposer des revêtements métalliques, sous forme de poudres à base de Ni. Ces revêtements ont été déposés, dans le but de rénover des pièces mécaniques soumises à l'usure. Pour améliorer d'avantage les caractéristiques de ces revêtements, des post-traitements sont

préconisés en vue d'homogénéiser ces derniers et permettre d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques. Pour cela, ces revêtements ont subi des post-traitements à différentes températures 400°C, 600°C et 800°C avec un temps de maintien d'une heure et un refroidissement à l'air. Des mesures de micro duretés, sous une charge de 200g, ont été également réalisées sur la surface des revêtements. Les essais d'usure ont été réalisés à sec dans une configuration pion-disque à différentes charges (5, 10, 15, 20, 30 et 40N) avec deux vitesses de glissement de 0,5 m/s et 1m/s en fonction du temps.

2. Les procédures expérimentales

2.1. Le substrat

Le substrat utilisé pour réaliser les dépôts est un acier non allié d'usage général de type E335. C'est un acier doux ordinaire hypoeutectoïde qui présente une bonne ductilité. Ce substrat est de forme cylindrique de diamètre 10 mm et de longueur 20 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

2.2. Dépôts réalisés

La poudre utilisée est un alliage à base Ni-Al-Mo, de granulométrie - 125 à 44 µm. Cette poudre a été obtenue par fusion et broyage, ce qui lui confère une morphologie anguleuse comme le montre la Figure 2.

Tableau 2 : Composition chimique du métal d'apport en alliage à base Nickel

Eléments (%)	Ni	Al	Fe	B	Si	Mo
Poudre à base Nickel	70-80	5-10	1-3	1-3	< 0.5	4-7

2.3. Le procédé et les paramètres de projection

Avant projection, les substrats sont préparés par sablage, préparation la plus classique dans le domaine de la projection, afin de promouvoir une bonne adhérence (accrochage mécanique) entre le substrat et le dépôt. Dans cette étude, le substrat utilisé est un acier de construction mécanique de nuance E335. Ce choix est motivé pour ses diverses applications dans l'industrie mécanique. L'élaboration des dépôts métalliques nécessite l'emploi d'un pistolet à flamme-poudre type « CastoDyn DS8000 ». Il consiste à introduire une poudre à travers l'orifice central d'une buse-brûleur, la poudre fond et est entraînée par les gaz oxygène-carburant (généralement oxygène-acétylène ou oxygène-hydrogène) sur la pièce à revêtir. Ce système de projection est peu énergétique. Les revêtements réalisés par ce procédé contiennent un taux d'oxydes élevé ainsi qu'une forte porosité pouvant approcher 20%. La qualité des revêtements dépend aussi de la qualité des poudres. Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure 1. Les différents dépôts ont été obtenus selon les paramètres de projection suivants: Pression de

Projection : 4×10^5 Pa ; Pression de l'oxygène : 4×10^5 Pa ; Pression de l'acétylène : 7×10^4 Pa ; distance de projection : 150 mm

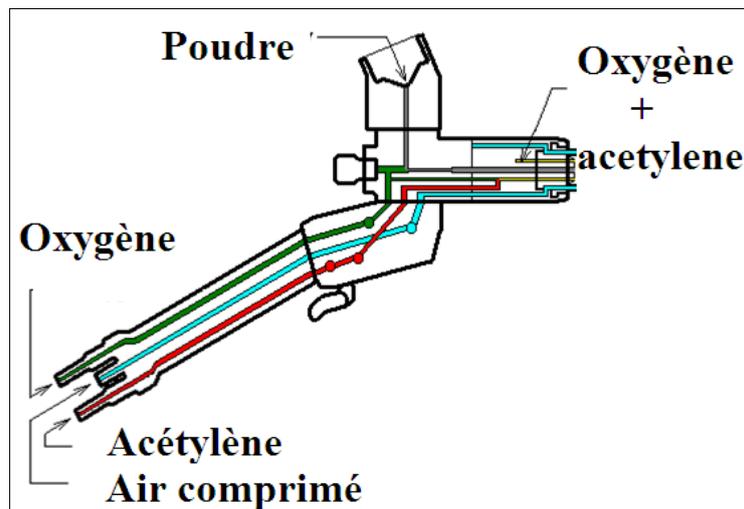


Figure 1: Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-poudre.

2.4. Les post traitements

Après avoir réalisé les dépôts issus de la poudre à base Nickel, des post-traitements ont été réalisés et qui consistent en un chauffage à des températures de 400°C, 600°C et 800°C pendant un temps de maintien d'une heure et suivi d'un refroidissement à l'air. Le but de ces post-traitements est de mettre le matériau dans un état proche de l'équilibre thermodynamique; recristalliser la matrice et améliorer l'adhérence des dépôts. Ces traitements thermiques ont été effectués dans un four type C1228 Cress Simple Chambre.

2.5. Diffraction X

Les diagrammes de diffraction RX ont été enregistrés à l'aide d'un diffractomètre de type X'PERT PRO MRD de chez PANalytical, de l'université de Béjaia, équipé d'un tube RX à anode en cuivre. Un temps d'acquisition de 40 s par pas angulaire de 0,04° a été utilisé sur l'intervalle s'étalant entre 35° et 100° (2θ). L'identification des phases cristallines présentes est faite par comparaison des raies observées avec celles des phases appropriées contenues dans la base de données PDF2

2.6. Microduretés

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 microduremètre 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. Cet appareil nous permet aussi d'avoir l'empreinte laissée par le pénétrateur lors d'un essai de microdureté.

2.7. Les essais tribologiques

Les essais tribologiques ont été réalisées à l'air ambiant en utilisant un tribomètre de type pion-disque. Le pion revêtu du dépôt, est appuyé contre le cylindre en acier 100Cr6. Sa dureté est de 62 HRC. Le pion est monté sur le bras articulé, de façon à réaliser un contact permanent pion-disque dont le diamètre de la surface apparente du contact (frottante) est de 3 mm. La rotation du bras autour de l'axe horizontal permet l'application de la charge P d'appui sur le pion. Pour assurer les

mêmes conditions d'essais, le cylindre est poli initialement à l'aide du papier abrasif de grade 2500. L'usure des pions est évaluée par la méthode de pesée (balance de précision 10^{-5} g) avant et après chaque essai.

Le taux d'usure est calculé selon l'équation suivante :

$$K_v = \frac{\Delta m}{N_c} \quad (1)$$

K_v : Taux d'usure

Δm : perte de masse relative.

N_c : nombre de cycles effectué lors de l'essai.

Les conditions des essais sont :

- Milieu ambiant relativement sec (20–23°C).
- Charges normales comprises entre 5 N et 40 N.
- Vitesses de glissement: 0,5 m/s et 1m/s.
- distance de glissement : 900 et 1800m.
- Durée de l'essai est de 30 min.

3. Résultats et discussions

3.1. Caractérisation structurale et microstructurale de la poudre.

La micrographie présentée dans la figure 2 illustre la morphologie de la poudre. Ce dernier présente une microstructure de particules micrométriques, de taille différente, avec des plans de fracture sur leur surface (cf. Figure 2-a), typiques de matériaux soumis à un processus de fusion, puis par la suite à une réduction de la taille par broyage.

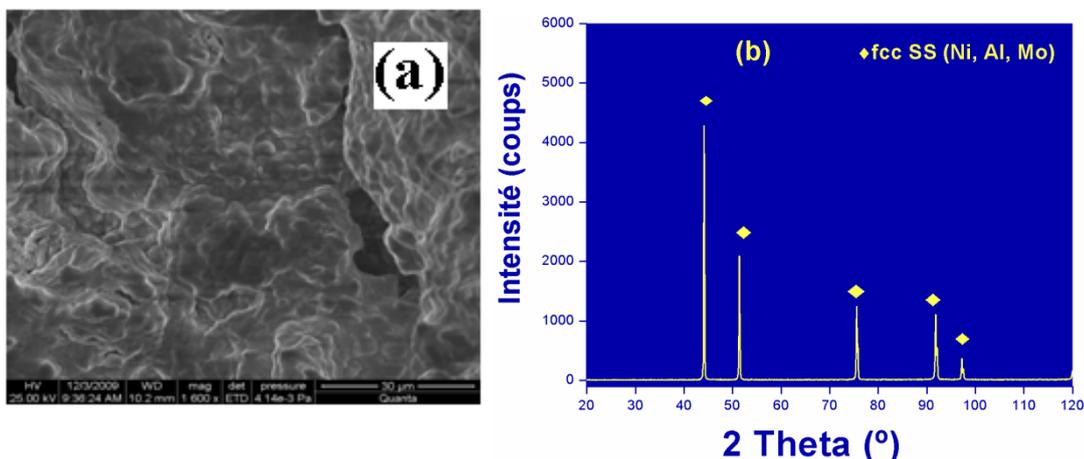


Figure .2- a) Microstructure de la poudre d'alliage à base Ni b) Spectre de diffraction X de la poudre à base-Ni

Le spectre de la DRX de la poudre en alliage Nickel est reporté à la figure 3. On distingue la présence d'une seule phase qui est une solution solide de structure cubique face centrée CFC (Ni, Al, Mo) comme phase majoritaire avec un paramètre de maille de 3,7910 Å.

La Figure 4 présente les analyses structurales des dépôts sans traitement et traités à 400°C, 600°C et 800°C issus de la poudre d'alliage à base Ni

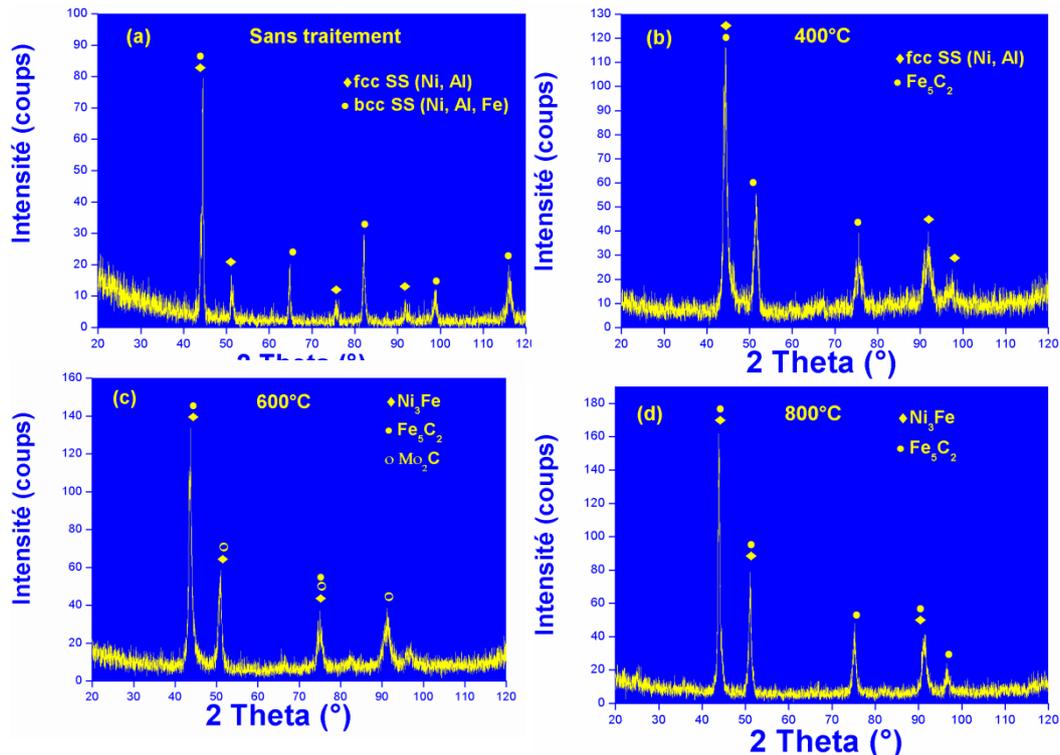
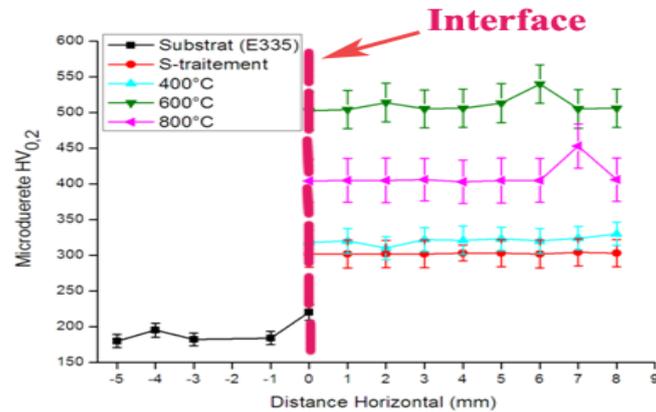


Figure 4: Spectre de diffraction X des dépôts à base-Ni. a) Sans traitement, b) 400°C, 600°C, 800°C.

Les spectres de diffraction X des dépôts non traités et traités thermiquement à 400°C (Fig.4a et b) a révélé la présence d'une phase commune qui est identifiée comme une solution solide de structure CFC (Ni, Al) avec un paramètre de maille de 3,5700 Å (JCPDS n° 050-1294). On peut également noter la présence des pics d'une autre solution solide CC (Ni, Fe, Al) avec un paramètre de maille de 2,7910 Å pour les dépôts sans post traitement. Tandis que le post traitement à 400°C a révélé l'apparition d'un carbure de fer type Fe_5C_2 (JCPDS n° 00-051-0997) de structure cubique. Parallèlement à cela, le traitement effectué à 600°C induit un net changement où on remarque la disparition de la fraction de la solution solide CFC et l'apparition de la phase intermétallique Ni_3Fe . On note aussi la formation du carbure de molybdène type Mo_2C (JCPDS n° 01-072-1683) et des carbures de fer type Fe_5C_2 . En revanche, le spectre de diffraction des rayons X des dépôts traités à 800°C a révélé la disparition de Mo_2C (JCPDS n° 01-079-0416); seulement la phase intermétallique Ni_3Fe et les carbures de fer type Fe_5C_2 sont présents.

3.3. Mesures de micro duretés

Les microduretés des différents dépôts réalisés sans post-traitement et avec traitements thermique réalisés à différentes températures 400°C, 600°C et 800°C ont été mesurées par indentation Vickers avec une charge de 200 g pendant 20s. Pour chaque traitement, l'écart type moyen calculé est basé sur la moyenne de 20 mesures. Les résultats de dureté Vickers, pour les différents dépôts réalisés sont présentés dans la figure 5.



Les microduretés moyennes du substrat et des dépôts sans post traitement et traités à 400°C 600°C et 800°C sont de l'ordre de : 201 HV0.2, 320HV0.2, 330 HV0.2, 530 HV0.2 et 430 HV0.2, respectivement. Le revêtement traité à 600°C est pratiquement deux fois plus dur que celui n'ayant pas subi de post-traitement. Cette augmentation de dureté peut être attribuée à la structure fine formée de lamelles très compactes et homogènes et les inclusions de carbure types Mo₂C. Le post traitement de 400°C ne semble pas affecter la nature du dépôt. En effet, il enregistre une microdureté de l'ordre de 330 ± 27 HV0,2 qui est pratiquement la même que celle du dépôt non traité. On peut remarquer aussi que les microduretés, les plus élevées, sont enregistrées au niveau des couches superficielles de ces revêtements. Ceci est peut être due à l'apparition d'oxydes provoqués par la mise en contact avec l'air.

3.4. Comportement tribologique

La figure 6 rassemble les résultats des taux d'usure en fonction des deux vitesses de glissement de 0,5 m/s et 1m/s pour les dépôts non traités et traités à différentes températures 400°C, 600°C et 800°C à différentes charges.

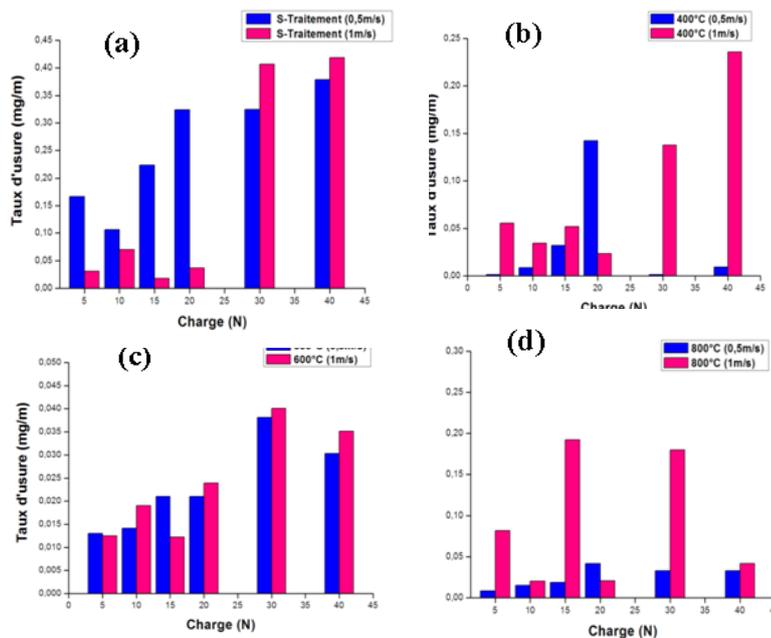


Fig.6. Taux d'usure des dépôts à différents post-traitements en fonction de la charge. a) Sans traitement, b) 400°C, 600°C, 800°C.

Les résultats ont montré que les dépôts en alliage Nickel réalisés sans post-traitement et avec un traitement thermique à 400°C, pour les charges au dessous de 20N, présentent un taux d'usure sous une vitesse de glissement de 0,5m/s supérieur à celui de 1m/s. Par contre, la tendance est inversée pour les charges au dessus de 20N. Pour les autres dépôts traités à 600°C et 800°C, on note que ces derniers se comportent identiquement face aux sollicitations. Cela se matérialise par un taux d'usure plus important sous une vitesse de glissement de 1m/s que celle de 0.5 m/s. Cette première partie de l'étude tribologique nous permet de dire que la vitesse de glissement influe sur le taux d'usure. Ceci peut être probablement expliqué par la phase d'accommodation des surfaces du disque et du pion lorsque le contact s'établit. Durant cette phase, on note l'élimination rapide de cette couche transitoire sous une vitesse de glissement de 1m/s et qui engendre ainsi une augmentation de la perte de masse.

Dans la figure 7, on présentera les résultats des taux d'usure en fonction de la charge pour les dépôts non traités et traités à différentes températures 400°C, 600°C et 800°C à différentes vitesses de glissement.

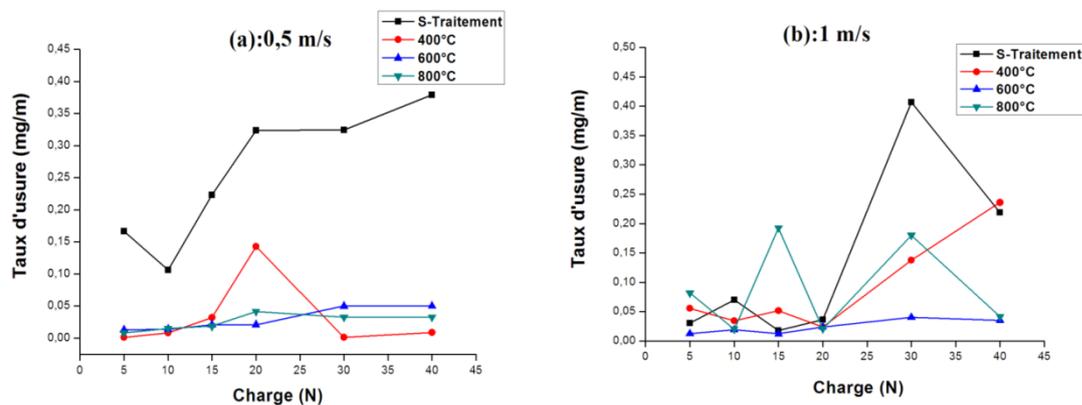


Fig.7. Taux d'usure des dépôts à différents post-traitements en fonction de la vitesse de glissement. a) 0,5 m/s, b) 1 m/s.

Les résultats ont montré que les dépôts en alliage Nickel réalisés sans post-traitement, sous une vitesse de glissement de 0.5 m/s, présentent un taux d'usure très élevé comparativement aux autres dépôts traités à différentes températures. Par contre, pour une vitesse de glissement de 1m/s, le taux d'usure a une allure atypique pour les dépôts sans post-traitement et traités à 400°C. Tandis le post-traitement à 600°C enregistre des taux d'usure plus faibles. Ceci est dû probablement à l'apparition de la phase homogène telle que les phases intermétalliques et les carbures type Mo₂C et Fe₅C₂. En revanche, le taux d'usure pour le post-traitement de 800°C augmente de façon considérable durant l'essai et cela pour les deux vitesses de glissement. Ceci est dû au phénomène de délaminage observé tout le long de l'interface substrat/dépôt (cf. Fig.8)

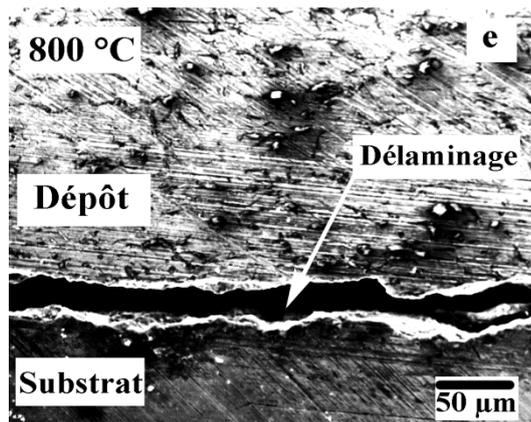


Fig.8 : Microstructure mettant en évidence le délaminage pour le post traitement à 800°C.

Ce délaminage a contribué à dégrader les propriétés des dépôts et donc aussi ses performances. Typiquement, on constate l'apparition de défauts de cohésion inter-lamelle et inter-passe, des variations de composition chimique et des différences entre les coefficients de dilatation thermique engendrant la fragilité du dépôt.

4. Conclusion

Ce travail consistait à déposer par projection thermique à flamme des revêtements à base de poudres en Nickel pour améliorer la résistance à l'usure et de voir l'influence des post-traitements sur la structure et les propriétés tribologiques. Les résultats trouvés ressortent les conclusions suivantes :

- Le spectre de la DRX de la poudre en alliage Nickel a révélé la présence d'une seule phase qui est une solution solide de structure cubique face centrée CFC (Ni, Al, Mo) comme phase majoritaire. Durant la projection, d'autres phases ont été formées pour les dépôts non traités et traités thermiquement à 400°C où on note la présence d'une solution solide commune de structure CFC (Ni, Al) avec la présence d'une autre solution solide CC (Ni, Fe, Al) pour les dépôts sans traitement et l'apparition d'un carbure de fer type Fe_5C_2 de structure cubique pour les dépôts traités à 400°C. Le traitement effectué à 600°C induit un net changement où on remarque la disparition de la fraction de la solution solide CFC et l'apparition de la phase intermétallique Ni_3Fe , le carbure de molybdène type Mo_2C et des carbures de fer type Fe_5C_2 . En revanche, le spectre de diffraction des rayons X des dépôts traités à 800°C a révélé la disparition de Mo_2C .

- Les mesures de micro duretés effectuées sous une charge de 200g ont révélé que le dépôt traité à 600°C présente des valeurs les plus élevées.

- Les essais tribologiques ont révélé, que pour toutes les conditions d'essais tribologiques réalisées, le taux d'usure des dépôts traités à 600°C sont inférieurs à ceux des dépôts non traités et traités à 400°C et 800°C. En outre le post-traitement à 600°C a enregistré des pertes de masses les plus faibles ce qui a amélioré la résistance à l'usure de ces dépôts.

Références

1. Z.q. Zhang, H.d. Wang, B.S. Xu, G.S Zhang, Investigation on influence of WC–Ni addition on rolling contact fatigue behavior of plasma sprayed Ni-based alloy coating, Tribol. Intern, 90 (2015) 509-518.
2. S. Huang, D. Sun, W. Wang, Microstructures and properties of Ni based composite coatings prepared by plasma spray welding with mixed powders, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 52 (2015) 36-43.

3. L. He, Y. Tan, X. Wang, T. Xu, X. Hong, Microstructure and wear properties of Al₂O₃-CeO₂/Ni-base alloy composite coatings on aluminum alloys by plasma spray, *Applied Surface Science*, 314 (2014) 760-767.
4. X.C. Zhang, B.S. Xu, S.T. Tu, F.Z. Xuan, H.D. Wang, Y.X. Wu, Effect of spraying power on the microstructure and mechanical properties of supersonic plasma-sprayed Ni-based alloy coatings, *Applied Surface Science*, 254 (2008) 6318-6326.
5. G. Ramakrishnan, G. Dwivedi, S. Sampath, A. Orlov, Development and optimization of thermal sprayed ceramic microfiltration membranes, *Journal of Membrane Science*, 489 (2015) 106-111.
6. G. Bolelli, A. Candeli, H. Koivuluoto, L. Lusvarghi, T. Manfredini, P. Vuoristo, Microstructure-based thermo-mechanical modelling of thermal spray coatings, *Materials & Design*. 73 (2015) 20-34.
7. L. Pawłowski, Strategic oxides for thermal spraying: problems of availability and evolution of prices, *Surface and Coatings Technology*, 220 (2013) 14-19.
8. L. Pawłowski, Microstructural study of plasma-sprayed alumina and nickel chromium coatings, *Surface and Coatings Technology*, 31 (1987) 103-116.
9. B. Uyulgan, H. Cetinel, I. Ozdemir, C. Tekmen, S. C. Okumus, E Celik, Friction and wear properties of Mo coatings on cast-iron substrates, *Surf. Coat. Technol* 174-175(2003) 1082-1088.
10. M. Fukumoto, Y. Huang, Flattening mechanism in thermal sprayed Ni particles impinging on flat substrate surface, *J. Thermal Spray Technology* 8 (1999) 427-432.
11. X. Huang, I. Etsion, T. Shao, Effects of elastic modulus mismatch between coating and substrate on the friction and wear properties of TiN and TiAlN coating systems, *Wear*, 338–339 (2015) 54-61.
12. L.G. Yu, X.S. Zhang, The friction and wear properties of electroless Ni-composite coating, *Thin Solid Films*, 245 (1994) 98-103.
13. L. Benea, S.B. Başa, E. Dănilă, N. Caron, O. Raquet, P. Ponthiaux, J.P. Celis, Fretting and wear behaviors of Ni/nano-WC composite coatings in dry and wet conditions, *Maters & Des*, 65 (2015) 550-558.
14. Y. Liang, Y.S. Li, Q.Y. Yu, Y.X. Zhang, W.j. Zhao, Z.X. Zeng, Structure and wear resistance of high hardness Ni-B coatings as alternative for Cr coatings, *Surf and Coat. Technol* 264 (2015) 80-86.