



Etude expérimentale de l'interaction laser/carbure de tungstène pour la fonctionnalisation d'un outil coupant

Hasnaa MELIANI*, Michaël FONTAINE, Alexandre GILBIN, Mohamed ASSOUL, Guy MONTEIL

Université de Bourgogne Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, ENSMM/UFC/UTBM, Département Mécanique Appliquée, 24 Chemin de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France

* Correspondante : hasnaa.meliani@femto-st.fr

Résumé : Cet article présente une démarche expérimentale pour fonctionnaliser un outil coupant, en carbure de tungstène, en vue d'améliorer ses performances en usinage. La méthode de fonctionnalisation utilisée est la structuration par laser femtoseconde. L'interaction entre le laser et le carbure de tungstène est étudiée et les différents régimes d'interaction sont identifiés. Trois types de structures ont été réalisés sur l'outil puis testés en usinage d'aluminium AU4G en comparaison avec un outil non fonctionnalisé. L'évolution des efforts générés lors de la coupe, l'usure sur la face de coupe et sur la face en dépouille sont examinées afin de témoigner de la performance de chaque outil. Une réduction de l'ordre de 90% de l'usure en dépouille peut être obtenue avec des outils fonctionnalisés.

Mots clés : Laser Femtoseconde, Carbure de tungstène, Interaction laser/matière, Fonctionnalisation, Tournage, Aluminium.

1 Introduction

Depuis la dernière décennie, la fonctionnalisation par structuration de surface est employée pour améliorer la performance et la durée de vie des outils coupants pour l'usinage de matériaux durs ou ductiles. Plusieurs dispositifs de fonctionnalisation ont été utilisés comme la micro-électroérosion (Yu, 2015), le faisceau d'ions focalisés (Kawasegi, 2009), le laser nanoseconde, picoseconde ou encore femtoseconde (Durairaj, 2018). La fonctionnalisation des outils de coupe par les dispositifs cités présente, pour

chacune de ces techniques, des avantages et inconvénients. Le procédé d'électroérosion est un procédé long. Pour la technique de faisceaux d'ions focalisés, l'environnement de travail se trouve en chambre à vide et la vitesse de traitement est lente. Enfin, même si la technique laser est assez coûteuse dans le cas d'un laser femtoseconde, elle offre un bon compromis entre la rapidité du procédé et la haute précision des structures obtenues à différentes échelles (nanométrique et micrométrique). Cette technique permet en plus d'obtenir des structures sans aucune étape supplémentaire de post-traitement.

Malgré la bonne usinabilité des matériaux ductiles comme l'aluminium, des problèmes d'adhérence sur l'outil surviennent lors de la coupe et peuvent mener à la casse de l'outil (Byrne, 2003).

(Durairaj, 2018) ont reporté que des structures de type trous réalisées sur la face de coupe d'un outil, pour l'usinage de l'aluminium en coupe orthogonale, permettaient de réduire les efforts de coupe et d'avance de l'ordre de 7 et 9% respectivement.

(Kawasegi, 2009) ont trouvé que des nanostructures accompagnées d'une légère ablation permettaient de réduire les efforts de coupe de 13 à 30% pour le tournage de l'aluminium. (Sugihara, 2012) ont observé une diminution de l'adhésion sur la face de coupe de l'outil structuré avec des lignes en comparaison avec l'outil de référence de l'ordre de 77%.

Dans notre étude, nous allons nous intéresser à la fonctionnalisation d'un outil coupant en vue d'améliorer ses performances pour l'usinage de l'aluminium dans un milieu lubrifié.

2 Démarche expérimentale pour la texturation d'outil coupant

2.1 Dispositif expérimental utilisé

Le dispositif laser utilisé pour les essais de structuration est un laser femtoseconde de type Tangor HP développé par Amplitude Systems® dont les principales caractéristiques sont présentées sur le tableau 1. Le faisceau émis par le laser est de type gaussien, il est amené jusqu'à la surface de l'échantillon cible au travers un chemin optique contrôlé par différents composants optiques. Le diamètre du faisceau a été mesuré avec un analyseur de faisceau, il est égal à $33,34 \pm 1 \mu\text{m}$.

Tableau 1 : Caractéristiques du laser Tangor HP utilisé

Puissance moyenne	Energie par pulse	Durée d'impulsion	Longueur d'onde	Taux de répétition
100 W	500 μJ	< 400 fs	1030 nm	1 kHz – 2 MHz

2.2 Etude de l'interaction laser/carbure de tungstène

La réponse d'un matériau face à des impulsions laser peut différer d'un élément à un autre car chaque matériau a ses propres propriétés optiques et thermiques. L'une des spécificités de l'interaction laser-matière est la formation, dans certaines conditions, de structures qui se présentent sous la forme d'ondulations nano-périodiques appelées LIPSS (Laser-Induced Periodic Surface Structures). Il existe pour chaque matériau des fluences seuils à partir desquelles il y a apparition de LIPSS et où débute les régimes

d'ablation athermique et thermique. La fluence correspond à la distribution énergétique du faisceau par unité de surface et s'exprime en J.cm^{-2} .

Pour un faisceau Gaussien, le profil de la fluence $F(r)$ est donné par (Liu, 1982) :

$$F(r) = F_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (1)$$

Avec r la distance depuis le centre du faisceau, F_0 la fluence crête au centre du faisceau ($r=0$) et ω_0 le rayon où la fluence est égale à $1/e^2$ de F_0 .

Dans le cas de tirs statiques, quand les fluences appliquées dépassent la fluence seuil d'ablation du matériau, il y a apparition d'un cratère. Ce dernier est caractérisé par son diamètre (D) et sa profondeur (h). La fluence seuil d'ablation pour N impulsions s'exprime comme (Jee, 1988):

$$F_{\text{seuil}}(N) = F_0 \exp\left(\frac{-D^2}{2\omega_0^2}\right) \quad (2)$$

En pratique, nous observons trois régimes d'interaction laser/matière qui apparaissent à trois seuils de fluences différents (figure 1) :

- A des fluences en dessous de F_{seuil}^s , la surface traitée ne subit aucune modification.
- A faible fluence, il y a apparition d'une texturation (LIPSS) sur la surface du matériau ($F_{\text{seuil}}^s < F < F_{\text{seuil}}^\alpha$).
- A fluence plus élevée, il y a une ablation faible, dite athermique avec l'apparition d'un cratère « propre » sans bavure ($F_{\text{seuil}}^\alpha < F < F_{\text{seuil}}^\lambda$).
- A plus forte fluence, il y a une ablation forte, dite thermique, qui conduit à la formation d'un cratère avec création de bourrelets ($F > F_{\text{seuil}}^\lambda$).

Où F_{seuil}^s , F_{seuil}^α et F_{seuil}^λ sont, respectivement, les fluences seuils de texturation, d'ablation athermique et thermique.

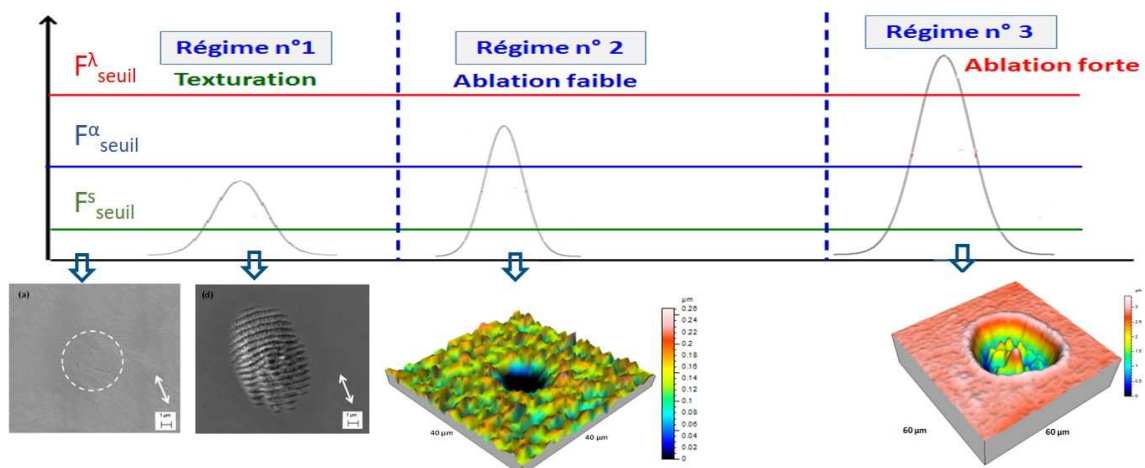


Figure 1: Trois principaux régimes d'interaction laser/matière

Afin de déterminer ces différents seuils pour le carbure de tungstène, une matrice de tirs statiques a été réalisée en faisant varier la valeur de la fluence et le nombre d'impulsions lors du tir laser. La figure 2 montre la matrice réalisée sur le carbure de tungstène comprenant des impacts ayant reçu un nombre d'impulsions variant de 1 à 100 pulses et une fluence de 0,0025 à 5 J/cm².

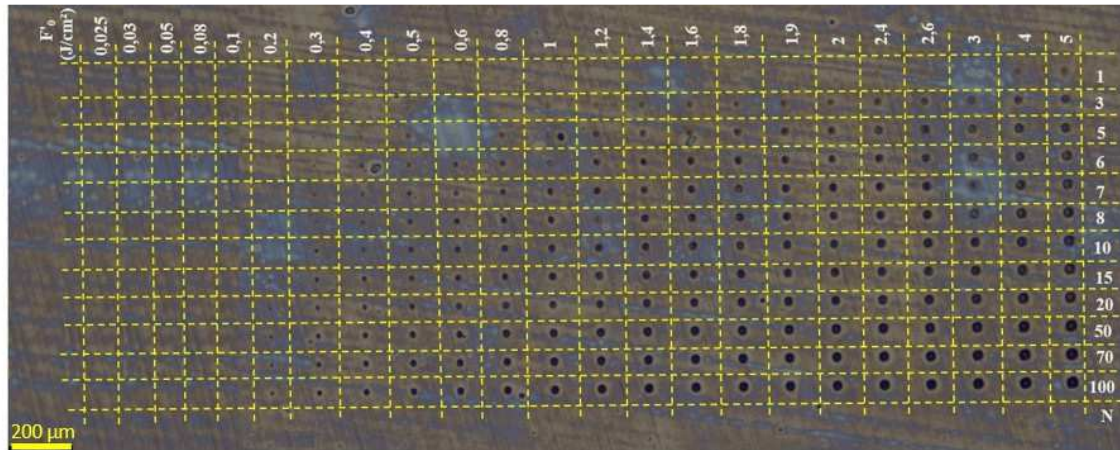


Figure 2: Image optique de la matrice de tirs réalisée sur le carbure de tungstène à différentes valeurs de fluence et de nombre d'impulsions

La figure 3 présente une image MEB+AFM d'un impact sur lequel apparaissent des LIPSS obtenu avec une fluence de 0,3 J/cm² et un nombre d'impulsions égal à 20. Le profil 2D le long des LIPSS montre que leur périodicité spatiale moyenne est de 665 nm et leur hauteur moyenne est de 225 nm.

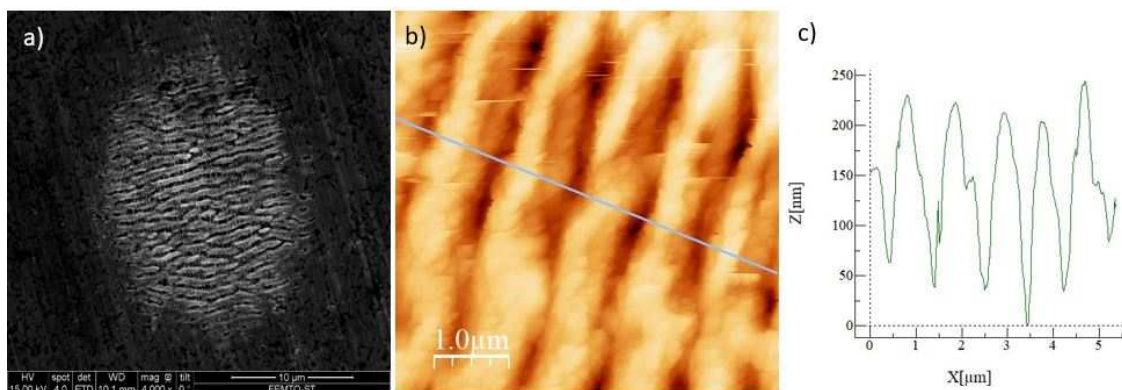


Figure 3: Apparition des LIPSS sur le carbure de tungstène pour $F_0 = 0,3 \text{ J/cm}^2$ et $N = 20$:
a) Image MEB, b) Image AFM, c) Profil le long des LIPSS

2.3 Fabrication de structures sur l'outil coupant concerné par l'étude

L'outil de coupe utilisé dans cette étude est un outil en carbure de tungstène contenant 6% de liant cobalt (Seco Tools® TPGN160304 F890) dont la taille de grain moyen du carbure est inférieure à 1 µm. Cet outil est non revêtu, sans géométrie brise-copeaux, avec un angle de coupe $\gamma = 0^\circ$ et un angle de dépouille $\alpha = 11^\circ$. L'outil est fixé sur un porte-outil de type CTGPR2020-16. Le choix d'une plaquette à face de coupe plane a été

conditionné par le dispositif laser utilisé pour la structuration, qui ne permet pas de réaliser des structures sur des géométries complexes.

Trois types de structures ont été réalisés sur la face de coupe de l'outil comme le montre la figure 4. Les lignes de taille nanométrique (LIPSS) ont une profondeur de 225 nm et une périodicité moyenne de 665 nm (figure 4.b). La structure à double-échelle (figure 4.c) a été produite en deux étapes en commençant d'abord par la structure nanométrique puis par la structure micrométrique. Les trous ont une profondeur de 9 μm , un diamètre de 38 μm et une période de centre à centre de 70 μm . Enfin, les lignes de taille micrométrique (figure 4.d) ont une profondeur de 9,5 μm , une largeur de 65 μm et une période de centre à centre de 150 μm .

Toutes les structures sont orientées parallèlement à l'arête de coupe et à une distance de 50 μm . Les outils sont nettoyés dans un bac à ultrasons avec de l'éthanol pendant 5 min avant et après structuration afin d'éliminer les débris éventuels.

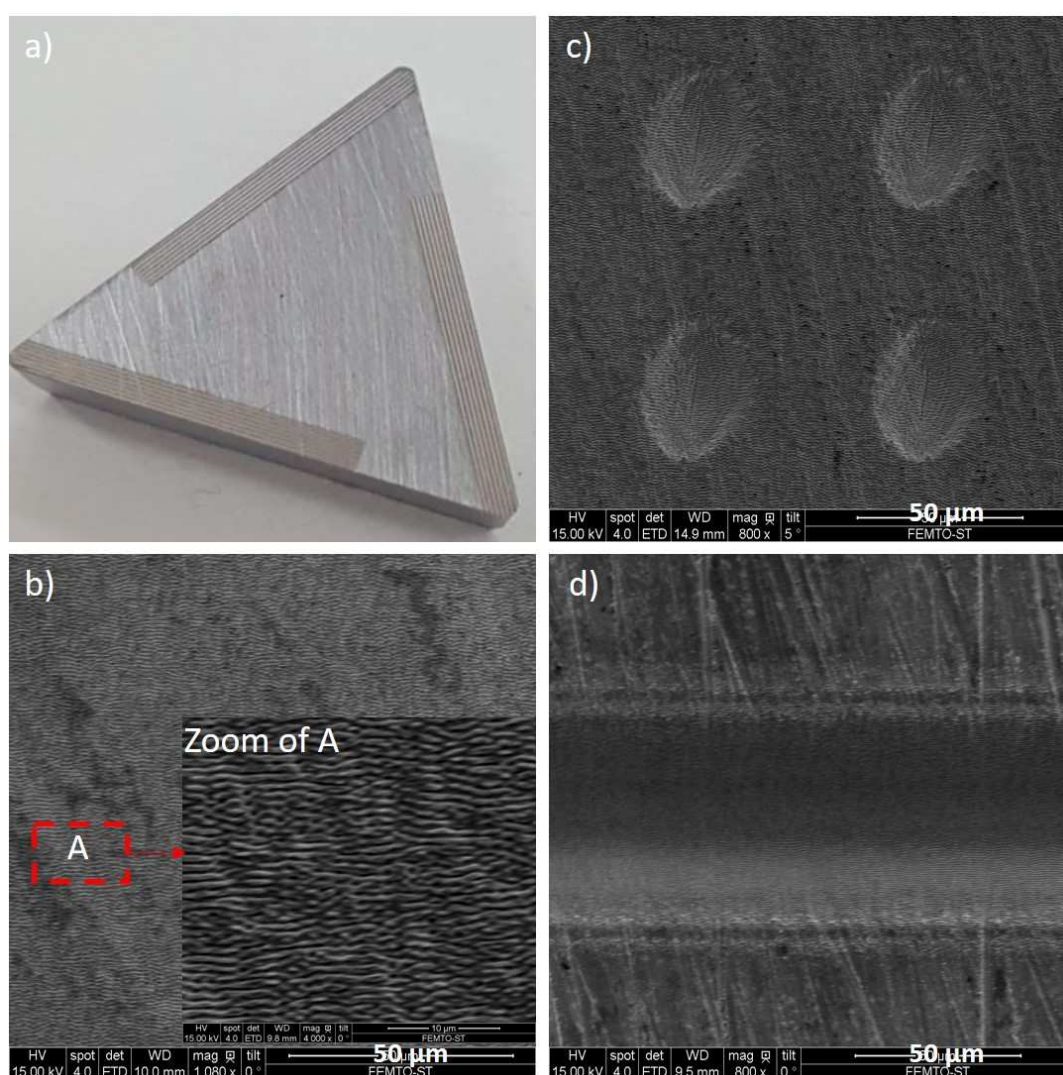


Figure 4: a) Image optique d'un outil texturé sur la face de coupe, b) Image MEB d'une structure nanométrique (LIPSS), c) Image MEB d'une structure à double-échelle, d) Image MEB d'une structure micrométrique

3 Validation en usinage d'outils texturés

3.1 Cadre expérimental

Les essais d'usinage ont été réalisés sur un tour à commande numérique 4-axes (Doosan Lynx 220Y) ayant pour principales caractéristiques une puissance maximale de la broche de 15 kW et une vitesse maximale de rotation de 6000 tr/min. La matière usinée est un alliage aluminium type AU4G, qui se présente sous forme de barres de 80 mm de diamètre. Les essais de coupe ont été conduits dans un milieu lubrifié en utilisant une huile entière (Castrol® Carecut ES-2) ayant une viscosité cinématique à 40°C égale à 8,8 mm²/s. Selon les recommandations du fabricant de l'outil, les conditions de coupe utilisées sont : vitesse de coupe $V_c = 485$ m/min, avance $f = 0,1$ mm/tr, profondeur de passe $a_p = 1$ mm. Un système de mesure composé d'une platine dynamométrique (Kistler® 9129 AEO) et d'un amplificateur de charge (Kistler® 5070) est adapté sur la machine pour obtenir les efforts générés lors des essais d'usinage. Les essais de coupe ont été répétés 3 fois sur l'outil de référence non fonctionnalisé et les résultats ont été reproductibles.

Les faces de coupe et de dépouille des outils testés sont observées par microscope électronique à balayage (SEM-FEI Quanta™ 450 W) et par microscope optique (Alicona Infinite focus®). L'usure en dépouille des outils testés est mesurée en utilisant un microscope numérique (Keyence® VH-ZST).

3.2 Résultats d'usinage

Les critères considérés pour évaluer la performance d'un outil texturé face à un outil brut ont été l'évolution des efforts générés lors de la coupe à savoir l'effort de coupe et l'effort d'avance, l'usure présente sur la face de coupe et enfin le critère V_b pour témoigner de l'usure en dépouille. Les signes qui témoignent de la fin de vie de l'outil pris en compte dans cette étude expérimentale ont été une augmentation brutale des efforts de coupe et/ou un enroulement permanent du copeau autour de la pièce usinée. Pour ces outils testés, la durée d'utilisation est présentée par ordre croissant : 40 secondes pour l'outil avec structure micrométrique, 70 secondes pour l'outil brut et 330 secondes pour les outils avec structure nanométrique et avec structure en double-échelle. Les deux premières durées représentent la durée maximale d'utilisation des outils car au-delà de cette durée les copeaux s'enroulent en permanence autour de la pièce usinée. Pour les outils testés pendant 330 secondes, cette durée ne représente pas la durée de fin de vie de l'outil.

La figure 5 présente les valeurs moyennes des efforts de coupe et d'avance ainsi que le rapport F_f/F_c pour l'outil non texturé et les outils texturés dans le cas du tournage d'aluminium. L'effort de coupe est semblable pour l'outil brut et les outils texturés avec une structure nanométrique et une structure micrométrique. Un effort de coupe plus faible a été observé avec l'outil structuré à double-échelle avec une réduction de 7%. Concernant les valeurs d'effort d'avance et du rapport F_f/F_c , ils ont augmenté pour les outils texturés par rapport à l'outil brut. L'effort d'avance généré avec l'outil brut est de 44 ± 1 N, quant aux outils texturés, il a été obtenu des valeurs de 88 ± 12 N, 48 ± 1 N et 53 ± 1

N qui correspondent respectivement aux outils avec une structure nanométrique, une structure micrométrique et une structure à double-échelle. La pression de contact à l'interface outil/copeau est plus élevée pour les outils structurés comparé à l'outil brut, ce qui peut expliquer des valeurs d'effort d'avance plus grandes.

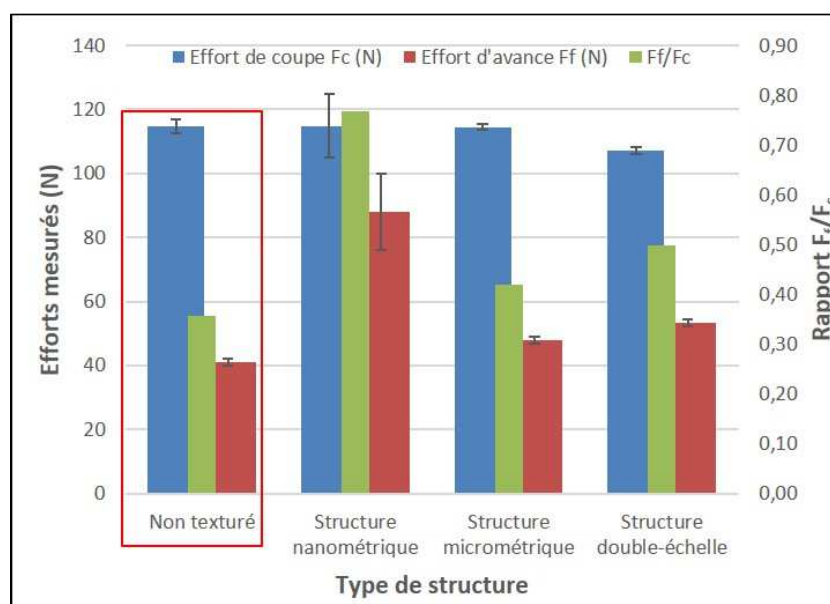


Figure 5: Comparaison des efforts de coupe (F_c) et d'avance (F_f) pour l'outil non-texturé et les outils texturés ; rapport F_f/F_c

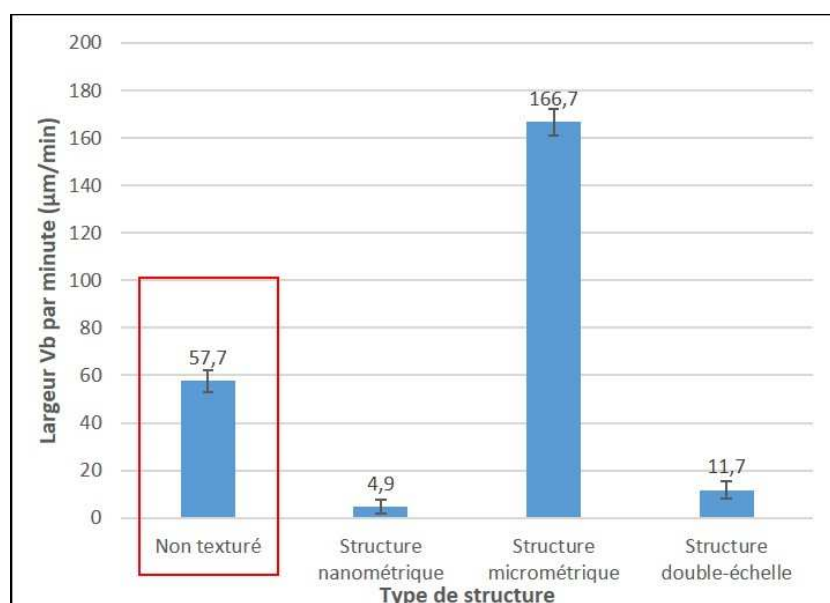


Figure 6: Comparaison de l'usure en dépouille par minute entre l'outil non-texturé et les outils texturés

Généralement, la largeur V_b témoignant de l'usure en dépouille évolue d'une manière linéaire en fonction du temps. Etant donné que, dans notre cas, le temps d'usinage était différent pour chaque outil testé, nous avons représenté sur la figure 6 la largeur V_b par minute pour l'outil brut et pour les outils texturés. On observe une réduction d'usure en

dépouille de 91% et de 80% pour l'outil avec une structure nanométrique et l'outil avec une structure à double-échelle respectivement. Tandis que l'outil avec une structure micrométrique de type lignes augmente l'usure en dépouille comparé à l'outil brut. Pour l'usinage d'aluminium, les LIPSS sur la face de coupe de l'outil permettent de réduire l'usure en face de dépouille.

Les figures 7 et 8 montrent l'usure sur la face de coupe des outils structurés et de l'outil brut. Une adhésion plus faible est observée sur l'outil avec une structure nanométrique comparé aux autres outils testés. Pour l'usinage d'aluminium, les LIPSS réduisent l'adhésion sur l'outil.

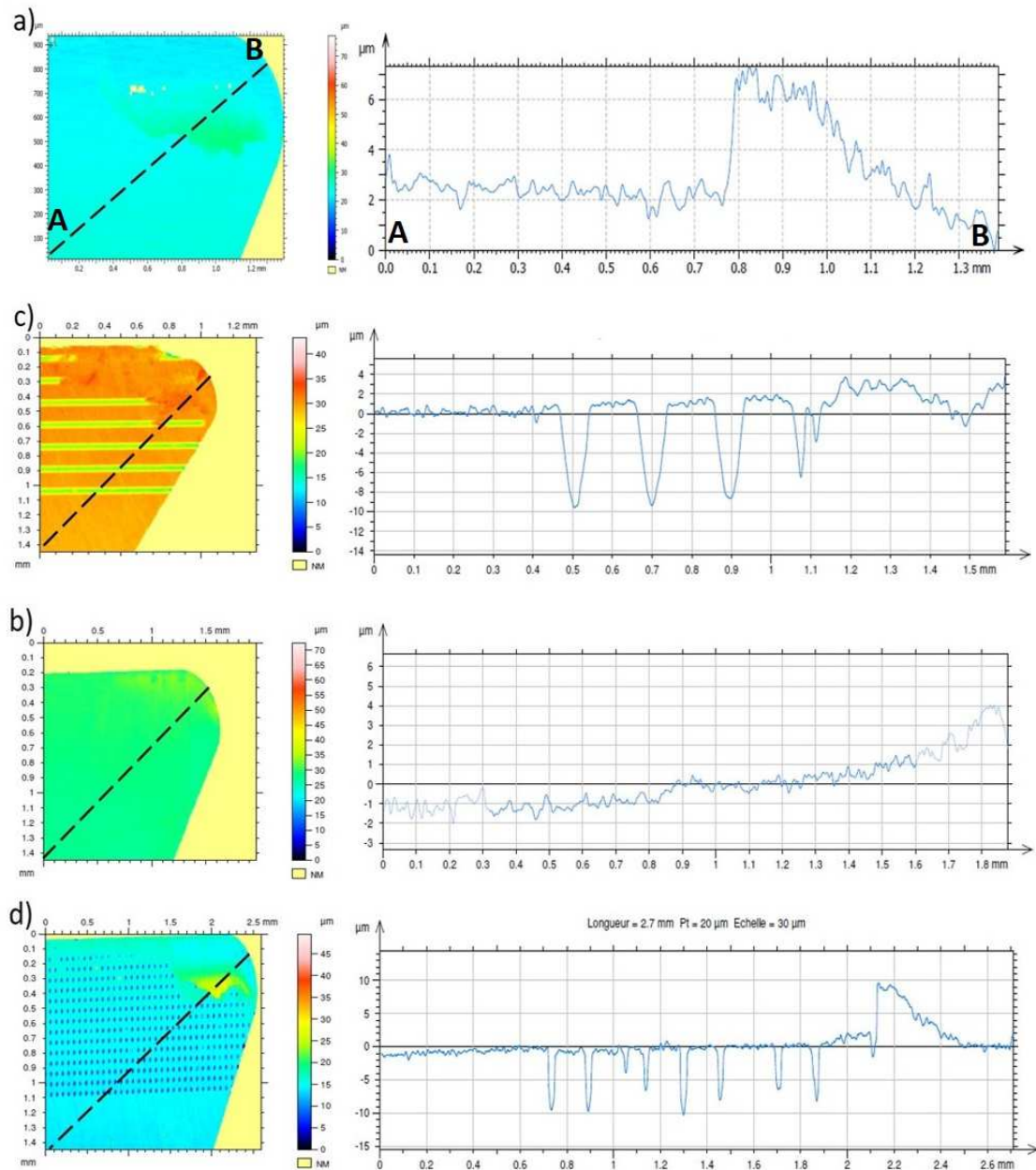


Figure 7: Profils 2D de la face de coupe de chaque outil testé : a) outil non-texturé, b) structure nanométrique, c) structure micrométrique, d) structure à double-échelle

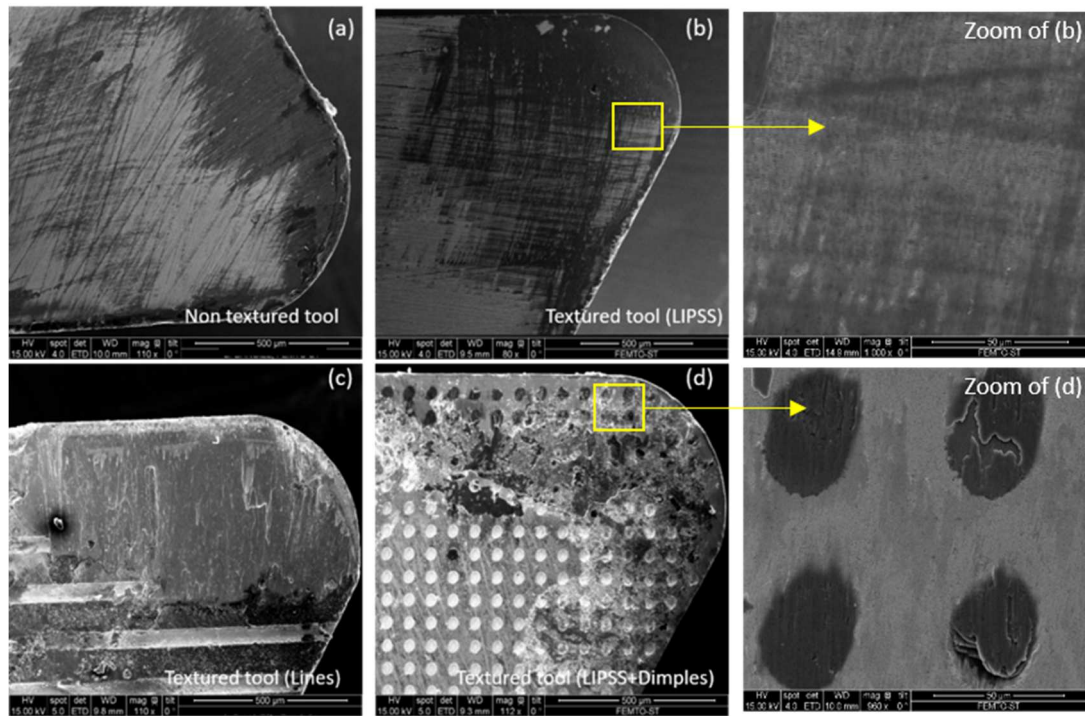


Figure 8: Images MEB de la face de coupe de chaque outil testé : a) outil non-texturé, b) structure nanométrique, c) structure micrométrique, d) structure à double-échelle

4 Conclusions

Cette étude a pour but d'introduire la démarche expérimentale menée pour la fonctionnalisation d'un outil coupant par structuration laser femtoseconde. L'influence de diverses structures réalisées sur la face de coupe de l'outil a été investiguée en vue d'améliorer ses performances pour l'usinage d'aluminium en milieu lubrifié. Les conclusions sont les suivantes :

- (1) Il n'y a pas de réduction significative d'effort de coupe entre les outils texturés et l'outil brut à l'exception de l'outil avec une structure à double-échelle qui présente une réduction d'effort de coupe de 7%.
- (2) L'effort d'avance est plus élevé pour les outils texturés comparé à l'outil brut à cause de la pression de contact qui est plus élevée à l'interface outil/copeau.
- (3) L'usure en dépouille est réduite de 91% et 80% respectivement avec les outils texturés avec une structure nanométrique et une structure à double-échelle.
- (4) L'adhésion sur la face de coupe de l'outil est réduite avec des structures nanométriques (LIPSS).

Les perspectives à cette étude sont nombreuses. Tout d'abord il s'agirait de vérifier la pertinence de ces textures pour d'autres nuances de matériaux usinés, notamment des aciers. En outre, un effort d'analyse par l'expérimentation et la modélisation est à réaliser afin de comprendre pourquoi des textures sur la face de coupe de l'outil ont tant d'influence sur l'usure en dépouille de celui-ci. Le rôle précis du lubrifiant dans la zone de contact entre la surface texturée et la pièce (ou le copeau pose) question également, en particulier pour des structures de type LIPSS. Enfin, il serait intéressant de tester ces textures prometteuses sur des outils à la géométrie 3D plus proche de la

réalité industrielle, y compris en micro-usinage pour lequel nous décelons un grand potentiel.

Remerciements

Les auteurs remercient les partenaires industriels spécialistes du décolletage DDLG et Baron, ainsi que le Conseil Régional de Bourgogne Franche-Comté pour le financement de ces travaux. Cette étude a été menée dans le contexte du groupe de travail Manufacturing'21 regroupant 20 laboratoires français. Les thèmes abordés sont la modélisation et l'optimisation des procédés d'usinage et l'innovation dans le domaine de la fabrication mécanique.

Références

- G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena (2003) *Advancing cutting technology*, *Annals of the CIRP*, vol. 52, pp. 483-507.
- S. Durairaj, J. Guo, A. Aramcharoen, S. Castagne (2018) *An experimental study into the effect of micro-textures on the performance of cutting tool*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, pp.1011-1030.
- Y. Jee, M.F. Becker, R.M. Walser (1988) *Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces*, *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 5, pp. 648-659.
- N. Kawasegi, H. Sugimori, H. Morimoto, N. Morita, I. Hori (2009) *Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior*, *Precision Engineering*, vol. 33, pp. 248-254.
- J.M. Liu (1982) *Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes*, *Optics Letters*, vol. 7, pp.196-198.
- T. Sugihara, T. Enomoto (2012) *Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture*, *Precision Engineering*, vol. 36, pp. 229-237.
- Z. Yu, C. Zhang, W. Wang, Y. Zhou, H. Yu (2015) *Design of micro groove texture tool and experimental study on high speed micro-turning*, *International Conference on Mechatronics and Automation*.