

Rectification d'outils de coupe pour l'usinage d'alliages de titane

Raymond Constantin, Georg Walder, Michel Stucki, Imane Bensmaini *

Dans l'industrie de l'usinage, la rectification par meulage des outils de coupe est le procédé généralement utilisé. Toutefois, ce procédé engendre des bavures et surtout, il arrondit l'arête de coupe. Un projet soutenu financierement par la HES-SO a permis de prouver que l'usinage laser donne une meilleure qualité d'arête. Le micro-usinage laser est d'ailleurs applicable sur des matières très dures, comme le métal utilisé dans ce projet. La matière usinée est l'alliage de titane grade 5, un materiau repute difficile à usiner, responsable d'une usure accélérée de l'outil de coupe

Les paramètres principaux testes dans le projet de micro-usinage laser d'outils de coupe soutenu par la HES-SO sont la vitesse, la distance entre les hachures et la puissance. D'autres paramètres ont été testes, comme la variation de l'angle d'incidence de 80o, qui a permis d'améliorer légèrement l'enlèvement de matière par rapport à un angle de 0o, mais qui n'a pas eu un effet aussi important que les autres. En optimisant les paramètres, dans une première étape, l'équipe de projet a pu obtenir des arêtes de coupe les plus tranchantes possibles. Des tests d'usinage ont ensuite été realises avec un tour sur un alliage de titane en utilisant un lubrifiant de Blaser Swisslube.

Les résultats ont montré qu'une arête plus tranchante obtenue par micro-structuration laser permet d'augmenter la durée de vie de l'outil de manière significative en diminuant l'usure en dépouille. De manière générale, l'usure en dépouille tolérée est de 0,3 mm avant de devoir remplacer l'outil. L'ajout d'un traitement PVD HiPIMS TiAlN a permis d'augmenter la durée de vie de l'outil. Ces excellents résultats s'expliquent par une meilleure évacuation des copeaux et, surtout, par une diminution de l'effort de coupe.

Les caractéristiques de l'outil de coupe

Un outil de coupe doit être tranchant et pour maintenir une arête vive, des materiaux durs et tenaces sont nécessaires. La dureté peut être corrélée à l'usure et une bonne ténacité permet de résister aux chocs et vibrations de l'outil sans qu'il se casse. Cependant, un materiau trop dur peut fragiliser l'outil, une augmentation de

la dureté se traduisant généralement par une diminution de la ténacité. L'outillage et les fixations doivent être les plus rigides possibles afin d'éviter au maximum les vibrations qui peuvent entraener un état de surface non homogène des pièces usinées. Plusieurs paramètres etudies plus en détail dans ce projet permettent d'optimiser cet état de surface. Un des paramètres importants est le tranchant de l'outil de coupe, qui est caracterise par le rayon de courbure. Ce paramètre joue un rôle très important dans la durée de vie de l'outil.

La rectification

La rectification d'outils est un procédé de fabrication par enlèvement de copeaux, utilisant des abrasifs ou des meules pour fabriquer ou affûter des outils de coupe. Les outils de coupe rectifies permettent de réaliser l'usinage par enlèvement de copeaux lors de la transformation du métal, du plastique, mais aussi du bois. Certains outils de coupe uses peuvent, par reaffutage, être à nouveau opérationnels en rétablissant la géométrie de l'arête de coupe. Le reaffutage permet ainsi de rétablir la qualité de la surface au niveau de l'arête tranchante. Il ameliore la qualité de coupe de l'outil use, sa longévité et donc sa rentabilité. Mais ce n'est pas le cas de la plupart des outils de coupe, la majorité d'entre eux étant jetée dès qu'ils sont uses.

Le meulage

Le meulage conventionnel génère des forces mécaniques et un impact thermique eleves, qui peuvent provoquer des microfissures, limitant ainsi la durée de vie de l'outil. L'une des méthodes les plus

performantes pour créer un tranchant idéal est la rectification laser par impulsions ultra-courtes. C'est l'un des procédés les plus récents permettant d'obtenir une grande précision, qui ne laisse aucune bavure sur les materiaux.

L'utilisation des lasers

L'utilisation du laser picoseconde permet une ablation «à froid» sans impact thermique ni mécanique, et de créer des microstructures, donc des arêtes très vives (sans l'arrondi cause par la rectification classique). Dès 2012, des études ont pu montrer que les lasers picosecondes sont capables de résoudre le problème de la fabrication d'outils pour l'usinage de nouveaux materiaux aux propriétes mécaniques supérieures – comme le traitement du nitrure de bore cubique (CBN) – et le potentiel intéressant de la fabrication d'outils de coupe au laser¹. D'autres travaux se sont principalement concentres sur la mise en forme des outils de rectification².

Par rapport à l'électroérosion, les outils fabriques au laser ont un rayon d'arête de coupe beaucoup plus petit (10 μm) et une plus faible rugosité. Ce procédé engendre des forces de coupe similaires; ainsi une durabilité supérieure des outils en diamant polycristallin (PCD) traites au laser par rapport aux outils revêtus en diamant synthétique (CVD) a pu être demontree³.

Da-Wang et al⁴ ont etudie le comportement à l'usure des plaquettes en céramique à base de diborure de titane (TiB₂) dans l'usinage à grande vitesse des alliages Ti₆Al₄V. Il a constate que les outils à base de TiB₂ présentent un taux d'usure progressive plus faible que le composite WC-Co

Références

1. Wegener et al. *Laser Prepared Cutting Tools*, Physics Procedia 39 (2012) 240-248.
2. M. Kadivar et al. *Laser-assisted micro-grinding of Si₃N₄*, Precision Engineering 60 (2019) 394-404.
3. M. Warhanek et al. *Comparative analysis of tangentially laser-processed fluted polycrystalline diamond drilling tools*, Journal of Manufacturing Processes 23 (2016) 157-164.
4. Da-Wang et al. *Wear behavior and mechanism of TiB₂-based ceramic inserts in high-speed cutting of Ti₆Al₄V alloy*, Ceramics International 46 (2020) 8135-8144.

commercial; d'autre part, la résistance à l'oxydation du cermet WC-Co est beaucoup plus faible que celle des outils à base de TiB₂, ce qui se traduit par une durée de vie plus courte des outils en WC-Co par rapport à ceux à base de TiB₂.

Toutes ces études publiées montrent que l'usinage de formes complexes par laser de matériaux très durs, tels que les céramiques ou cermets, est tout à fait possible et permet d'obtenir des résultats remarquables, aussi bien sur la tenue des outils de coupe, que sur la qualité des surfaces usinées.

La rectification laser pouvant améliorer les performances des outils de coupe, cette technologie a été combinée avec les revêtements PVD HIPIMS afin d'étudier l'amélioration du comportement global en utilisant conjointement ces deux technologies. Dans cette étude, il a été utilisé un revêtement à base de nitrure (TiAlN) déposés par pulvérisation magnétron à impulsions haute puissance (HIPIMS, High Power Impulse Magnetron Sputtering)⁵⁻⁶.

Le micro-usinage laser

La plupart des modèles et des expériences montrent que les impulsions laser d'une durée supérieure à 20 picosecondes ont un impact thermique, tandis que les impulsions courtes (< 10 ps) génèrent un impact thermique faible ou négligeable sur le matériau usiné (ablation froide). Avec le laser à impulsions de 10 ps utilisé dans ce projet, nous avons pu démontrer une ablation non thermique pour l'acier ainsi que le métal dur. Un premier test préliminaire avec deux qualités de cermets a confirmé ce comportement.

La méthode proposée ici pour la fabrication d'outils de coupe est très innovante, car elle permet de fabriquer des outils de coupe à partir des matériaux les plus durs (ayant des géométries 3D complexes) avec une précision de l'ordre du micron, sans aucun impact thermique ni mécanique. Jusqu'à présent, cela était impossible ou ne pouvait se faire qu'avec une usure très importante – donc coûteuse et moins précise – en utilisant des rectifieuses conventionnelles spéciales et complexes (Rolomatic) ou des machines combinées de rectification et d'électroérosion (Vollmer).

La détermination des paramètres du laser

Les paramètres du laser pour un matériau donné doivent être déterminés expérimentalement.

De nombreux tests basés sur des plans d'expérience ont été menés pour déterminer les paramètres laser optimaux, tels que la fluence, la distance focale, le chevauchement et la fréquence des impulsions. Des échantillons de titane ont été usinés, le taux d'enlèvement de matière et la rugosité de la surface ont été mesurés, ainsi que la possibilité d'un impact thermique.

Dans l'installation, le faisceau laser traverse plusieurs éléments optiques jusqu'à une tête de scanner. Ce scanner permet un contrôle très précis du faisceau laser dans le plan X-Y, ainsi que de régler la vitesse du faisceau jusqu'à 2 m/sec. La vitesse du scanner ainsi que la distance d'hachurage ont été ajustés et la trajectoire finale du faisceau a été calculée pour une géométrie donnée, tout en maintenant la bonne distance focale. Le défi consiste à obtenir un rayon d'arête de coupe et des géométries de fraise (angles entre les différentes faces) aussi faibles que possible, sans impact négatif, comme la création de microfissures en surface, par exemple.

Dans ce cas, lorsque nous voulons affûter des fraises au laser pour obtenir des arêtes de coupe très vives, il s'agit d'un véritable défi en 3D. Sur les deux surfaces – la face de coupe et le flanc de la fraise –, le laser doit enlever de fines couches de matériau de manière très contrôlée, afin de générer une arête de coupe d'un rayon de quelques microns sans endommager la surface. Les fraises ont une géométrie complexe, la face de coupe et le flanc étant plus ou moins perpendiculaires l'un à l'autre. Un système de positionnement d'outil motorisé dédié est donc nécessaire, comprenant des microscopes et des buses de flux d'air, notamment, pour assurer une interaction précise du faisceau laser (\pm quelques μ m).

Le scanner galvanomètre IntelliScan 14

Le scanner galvanomètre IntelliScan 14 est un moteur rotatif destiné à des utilisations optiques, qui permet de positionner rapidement et précisément des miroirs pour dévier les faisceaux laser. Cette technologie utilise des aimants mobiles, ainsi qu'un détecteur de position pour dévier le faisceau laser. Le rayonnement est focalisé sur l'échantillon par une lentille télécentrique d'une longueur focale de 100 mm, la taille du spot étant de 10 μ m. Le logiciel SamLight permet de contrôler le scanner.

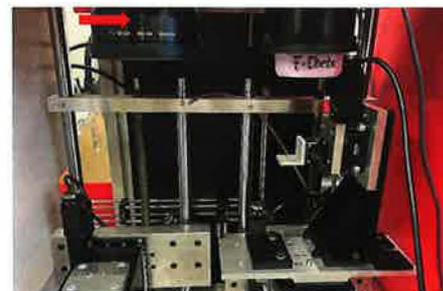


Fig. 1 : le dispositif de micro-usinage Scanner IntelliScan 14 a été utilisé.

Les tests d'usinage

L'usinage des matériaux par enlèvement de copeaux entraîne également une usure de l'outil de coupe, usure qui est mesurée conformément à la norme ISO-3685, par exemple. La hauteur de l'usure du flanc se termine lorsque l'outil doit être remplacé (pour éviter une défaillance ou une rupture de l'outil). Le taux d'enlèvement de matière et l'usure de l'outil dépendent tous deux des paramètres d'usinage que sont la vitesse de coupe, l'avance ou la profondeur de coupe. Pour un outil et un matériau à usiner donnés, le fabricant de l'outil recommande des valeurs cibles pour les outils du commerce. Dans le cas présent, il a fallu trouver ces paramètres de coupe optimaux.

Pour l'usinage, les chercheurs ont utilisé une machine de tournage CNC équipée de capteurs de force (Kistler) permettant de mesurer les forces de coupe générées durant l'usinage. Ces forces sont un indicateur de l'usure de l'outil, car des arêtes de coupe non tranchantes, ainsi que d'autres phénomènes d'usure, comme l'accumulation, augmentent la force nécessaire à l'enlèvement de matière.

Lors des essais d'usinage comparatifs, des fraises commerciales en métal dur de forme similaire ont été utilisées avec les paramètres de coupe optimaux, ainsi que des plaquettes en métal dur micro-usinées au laser et dotées de revêtements HIPIMS. Pendant les essais, les forces de coupe ont été mesurées et après un certain temps (toutes les 1-2 minutes environ), l'usure de l'outil a été étudiée à l'aide d'un microscope conformément à la norme ISO. En utilisant cette stratégie, l'objectif était une augmentation significative de la durée de vie de l'outil d'au moins 50 %, par exemple – avec un taux d'enlèvement et une qualité de surface similaires –, par rapport à un outil standard du commerce.

Références

5. M. Arab et al, *Properties of TiSiN coatings deposited by hybrid HIPIMS and pulsed-DC magnetron co-sputtering*, Vacuum, (2014) 43-51.
6. Chi-Lung Chang et al, *Effect of target composition on the microstructural, mechanical, and corrosion properties of TiAlN thin films deposited by high-power impulse magnetron sputtering*, Surface and Coatings Technology, (2018) 330-337.

L'ablation laser

Les images au microscope confocal montrent que l'arête avant rectification est arrondie, impactant ainsi négativement la coupe, car plus le rayon de courbure de l'arête est grand, plus les forces de coupe sont importantes, entraînant une usure prématurée de l'outil (figure 2).

L'ablation laser permet de réduire cette arête de l'outil. La première étape consiste à rectifier l'arête de coupe du matériau par rectification tangentielle, la seconde d'usiner orthogonalement l'outil afin d'aug-



Fig. 2 : arête de coupe arrondie avant rectification au laser.

menter la dureté au niveau de la pointe de l'outil. La création de cavités va augmenter l'indentation de la zone. On usine donc sur les deux faces qui lient l'arête de coupe. Avant rectification laser, nous obtenons un rayon d'arête compris entre 90 et 120 μm . Avec les paramètres optimaux validés, en fonction du taux d'enlèvement de matière, nous avons pu réduire au maximum le rayon d'arête, à savoir entre 11 et 17 μm .

L'influence des paramètres de coupe

Le tournage du titane a été réalisé avec un tour Harrison (figure 3) en utilisant une émulsion d'eau et d'huile fabriquée par SwissLube.

L'effet des paramètres de coupe (vitesse d'avance V_c , vitesse de coupe V_a et profondeur de coupe P_c) ont tout d'abord été étudiés avec des plaquettes standards en métal dur de Sandvik. Le résumé de l'influence des paramètres de coupe sur l'usure de est indiqué sur le graphique de la figure 4.



Fig. 3 : le tour Harrison utilisé pour les essais d'usinage.

On remarque que la profondeur de coupe a peu d'effet sur la durée de vie de l'outil par rapport à la vitesse d'avance et à la vitesse de coupe. Mais une profondeur trop faible entraîne un mauvais contrôle des copeaux car mal éjectés, de fortes vibrations, une chaleur excessive et un coût de matière trop élevé. Et si la profondeur est trop grande, on observe une rupture prématurée de la plaquette, ainsi que des forces de coupe plus grandes que nécessaire. On observe également que la vitesse de coupe est le facteur le plus important dans la durée de vie de l'outil. Une vitesse trop élevée entraîne une usure en dépouille, un mauvais état de surface, ainsi qu'une usure en cratère rapide. Mais une vitesse de coupe trop faible peut aussi engendrer une usure importante de l'arête. Nous avons pu observer que lorsqu'on augmente la vitesse

d'avance et la profondeur de coupe, il est préférable de baisser la vitesse de coupe.

Pour le titane grade 5, nous avons pu ainsi trouver les conditions d'usinage optimales : vitesse de coupe de 40-60 m/min, vitesse d'avance de 0,15 mm/tour et profondeur de coupe de 1 mm.

L'usure des plaquettes de coupe

Pour étudier l'effet d'un revêtement de surface HIPIMS et de la rectification laser, l'étude a comparé trois types de plaquettes de coupe : une plaquette conventionnelle sans revêtement et sans traitement laser (courbe 1), une plaquette rectifiée laser sans revêtement PVD (courbe 2), une plaquette standard avec revêtement PVD HIPIMS TiAIN (courbe 3) et une plaquette rectifiée laser avec revêtement PVD HIPIMS TiAIN (courbe 4). Les résultats figurent sur le graphique de la figure 5.

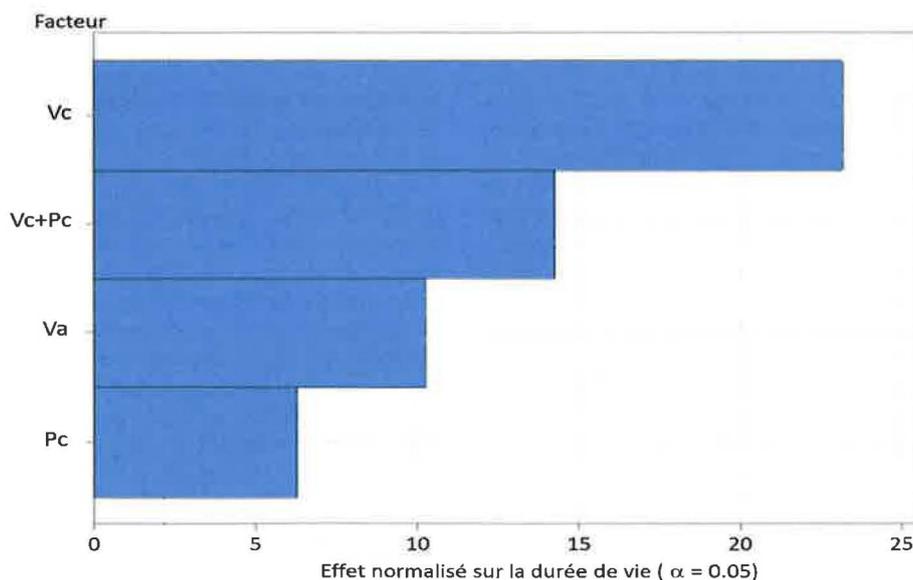


Fig. 4 : diagramme de Pareto des effets normalisés des paramètres de coupe.

Sur ce graphique, on remarque globalement que les premières passes génèrent une augmentation un peu plus rapide de l'usure des plaquettes non revêtues. Sur cette première partie, on voit que l'outil nécessite presque toujours un temps d'accommodation avant que l'usure ne devienne plus ou moins linéaire avec le temps. Cette augmentation de l'usure au début (zone de rodage) est due à un coefficient de frottement plus élevé au début de l'usure. La présence d'un revêtement PVD limite cet effet. L'usure a un effet direct sur la géométrie de l'arête, ce qui modifie le comportement de l'usinage.

Pour la plaquette standard non traitée, on observe un endommagement cyclique par déformation plastique qui a provoqué la rupture au bout de la quatrième passe, soit 23 minutes d'usinage.

Pour la plaquette rectifiée ayant reçu un traitement de surface, on observe une durée de vie de près d'une heure avant d'arriver à la recommandation ISO de 0,300 mm. Plus précisément, on atteint 0,282 mm à 57 minutes d'usinage. Nous arrivons donc à améliorer la durée de vie de l'arête de l'outil par un facteur de 2,5.

En termes d'usure de la plaquette sur une passe, le graphique de la figure 6 permet d'observer des différences importantes jusqu'à un facteur 4 entre la référence et la plaquette rectifiée laser avec revêtement PVD HIPIMS.

Conclusion

La méthode étudiée dans ce projet consiste à rectifier les arêtes des plaquettes de coupe en métal dur en diminuant le rayon de courbure par rectification laser. Le but était de rendre la zone de coupe la plus tranchante possible. C'est dans ce contexte que l'on a réalisé des tests pour chercher à diminuer cette usure sur les outils en considérant tous les paramètres de coupe. On a pu ainsi diminuer fortement le rayon de courbure de l'arête de coupe d'un facteur 7 à 8.

La deuxième phase du projet consistait à étudier l'influence du tranchant de l'arête sur la durée de vie de l'outil et sur l'état de surface des pièces usinées. La matière en titane pose souvent des problèmes, car elle a tendance à coller sur l'outil et augmente l'usure. L'équipe de projet a remarqué que l'usure de l'outil est assez complexe à

déterminer en raison de la reproductibilité des résultats, mais elle a pu montrer que l'usure des plaquettes s'atténue de manière significative avec la diminution du rayon de courbure du tranchant rectifié. Un revêtement de surface PVD HIPIMS améliore encore la résistance à l'usure globale. En combinant la rectification laser avec un revêtement PVD HIPIMS, les chercheurs ont pu diminuer la vitesse d'usure d'un facteur 4 sur une passe et augmenter la durée de vie de l'outil d'un facteur 2,5.

Remerciements

Les auteurs de cet article tiennent à remercier la HES-SO qui a permis de réaliser ce projet grâce son soutien financier. ■

***Raymond Constantin**

Haute Ecole Arc Ingénierie, Neuchâtel

Georg Wälder et Michel Stucki

HEPIA, Genève

Imane Bensmaini

Rolex, Genève

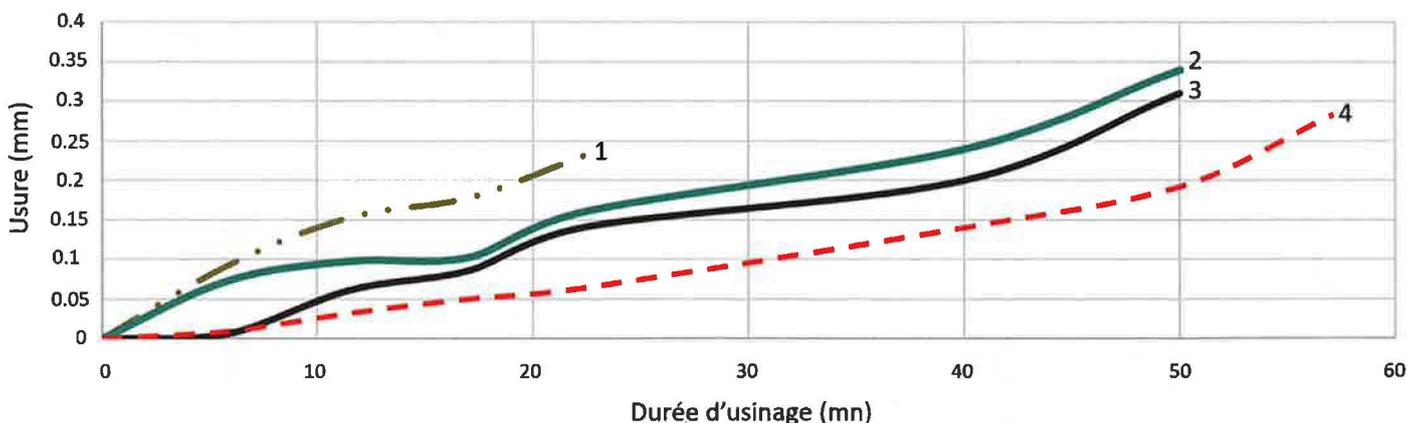


Fig. 5 : performance en usure des plaquettes de coupe. Vitesse de coupe : 60 m/mn ; vitesse d'avance : 0,2 mm/tour.

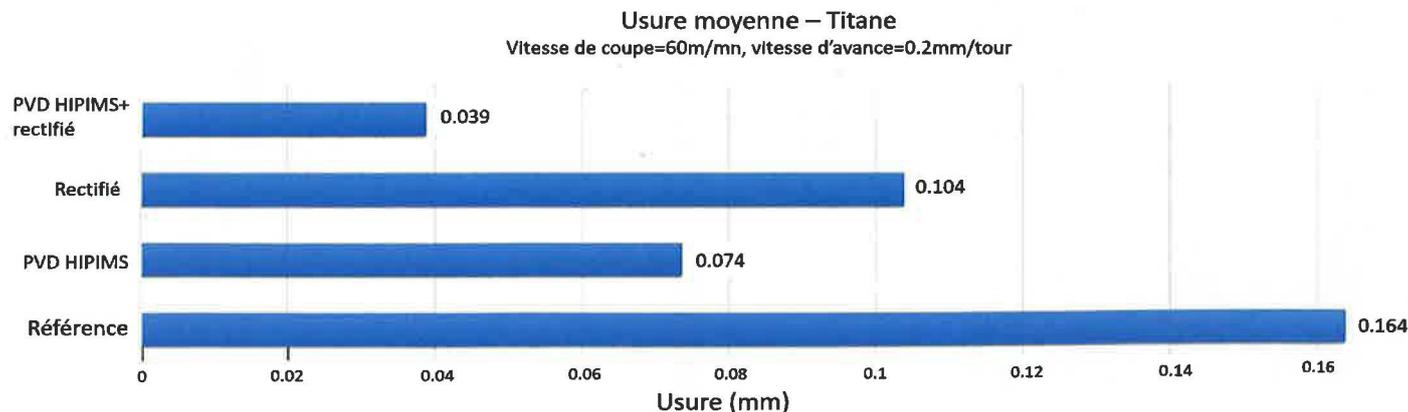


Fig. 6 : comparaison des usures moyennes entre différents types de plaquettes.