

Impact du revêtement sur le comportement à l'usure et sur la rugosité de la surface usinée en fraisage frontal de l'acier C18

Mohieddine Benghersallah et Lakhdar Boulanouar

Laboratoire Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle (LR3MI),
Département de Génie Mécanique,
Université Badji Mokhtar, BP12, Annaba 23000, Algérie.

Accepté le 12/06/2008

هذه الدراسة المقترحة تركز على معاينة تجريبية لإمكانية القطع لمادة الكريبيد. لقد أجريت التجارب على نوعين من اللقم الكريبيدية : الأولى بدون علاج والثانية تحتوي على طبقة سطحية من نتريد التيتان. في التفريز السطحي لماد الدراسة ه المتابعة من جهة تآكل الحد القاطع للقم بالنسبة لزمن القطع ومن جهة أخرى مدى تطور حالة السطح. النتائج التجريبية المحصل عليها سمحت بوضع قانون يبين العلاقة الكمية والكيفية بين عناصر القطع من جهة والنتائج التكنولوجية المتمثلة في مدة عمل وحالة السطح المحصل عليها من جهة. تحليل النتائج التجريبية ابرز بوضوح إن إمكانية التفريز للقم المعالجة سطحية بطبقة من كريد التيتان هي الغير معال. زيادة على القيمة المحددة لحالة السطح المشغل المرتفعة وقيم التغذية المنخفضة.

الكلمات المفتاحية: تفريز سطحي قطع الكريبيد تغليف ISO C18

Résumé

Cette étude est basée sur une analyse expérimentale des performances de coupe de plaquettes de fraisage en carbure métallique ISO P35. La première série est non revêtue et l'autre revêtue avec une simple couche de (TiN). Les essais sont réalisés en fraisage à l'aide d'une fraise à surfacer de type tourteau à huit dents lors de l'usinage de l'acier ISO C18. L'objectif est le suivi, d'une part de l'évolution de l'usure en dépouille de ces plaquettes en fonction du temps, et d'autre part de la rugosité en fonction des conditions de coupe et de l'usure. Les résultats expérimentaux obtenus permettent d'établir des modèles mathématiques exprimant la relation qualitative et quantitative entre les éléments du régime de coupe et les paramètres technologiques exprimés par la durée de vie (T) et la rugosité arithmétique de la surface usinée (Ra). L'analyse des résultats a fait ressortir que les plaquettes revêtues sont de trois à quatre fois plus performantes. Ce qui permet également d'obtenir des surfaces usinées de meilleure qualité. En effet, la valeur de Ra est réduite de moitié pour les régimes à grandes vitesses de coupes et faibles avances.

Mots clés : Fraisage; carbures métalliques; revêtements d'outils; usure; acier ISO C18; Rugosité.

Abstract

This study is based on an experimental analysis of cutting performances for two nuances of metallic carbides. The first carbide insert is uncoated and the second is coated with one layer of (TiN). The tests are realized under face milling of ISO C18 steel using a surfacing cutter with eight teeth. The objective of this study is to follow the evolution of tool wear according to time and to assess roughness according to both cutting conditions and wear rates. The results allowed establishing mathematical models relating the work conditions and the technological parameters such as tool life and machined surface roughness (Ra). Analysis of the results showed that the coating inserts have 3 to 4 times better performance in terms of tool life in comparison with the uncoated ones. In terms of surface quality, the value of the absolute roughness is reduced by half under high cutting speeds and small feed rates per tooth.

Key words: Face milling; metallic carbides; tool coatings, wear; steel C18; roughness.

1. INTRODUCTION

Les fraises monoblocs en acier rapide travaillent avec des vitesses de coupe limitées à de 60 m/min. Les opérations de réaffûtage sont longues et onéreuses. L'avènement des carbures métalliques frittés sous forme de plaquettes insérées dans les corps de fraises avec des géométries de coupe appropriées, a permis l'usinage des aciers avec des vitesses de coupe allant jusqu'à 200m/min [1,2]

Le progrès réalisé dans le domaine du traitement des surfaces par les revêtements par dépôts chimiques (CVD) et physiques (PVD) a permis d'usiner les matériaux les plus difficiles à façonner avec de grandes vitesses de coupe [3,4]. Les revêtements simple couche et multicouches des plaquettes en carbure métallique sont actuellement très employés pour l'usinage des métaux durs comme les aciers à outil traités et les fontes trempées [4-6].

L'usure des outils est un processus de destruction de couches superficielles, qui conduit à la modification progressive de la forme et de l'état de surface de la partie active de l'outil. Elle affecte également la géométrie de l'outil, la température, les efforts de coupe, la précision d'usinage et la rugosité de la surface usinée. Elle se traduit par un arrachement de petites particules de métal des surfaces d'attaque et de dépouille principale et auxiliaire de l'outil [7,8].

Il est à noter que l'usure des outils de coupe se manifeste dans des conditions de travail beaucoup plus difficiles que celles des pièces de machines. En effet la pression spécifique dans les surfaces de contact de pièces de machines ne dépasse pas quelque MPa et la température d'échauffement est inférieure à 100°C, alors que la pression spécifique dans les surfaces de contact de la partie active d'un outil est de l'ordre de 1000 à 2000 MPa et la température d'échauffement peut

atteindre 1000°C et parfois plus [8,9].

Il est à noter également que par rapport au tournage, le fraisage reste un procédé peu étudié. Il possède la particularité d'être un processus de coupe interrompue.

En effet en fraisage l'évolution de l'usure de l'outil ne dépend pas d'une seule plaquette de coupe mais de toutes les dents constituant l'outil fraise. Au cours du fraisage d'ébauche et de semi – finition l'augmentation de l'avance par dent et de la profondeur de passe sont recommandées par les fabricants d'outil pour les matériaux les plus courants, les opérations de finition sont conditionnées par la précision dimensionnelle et géométrique des pièces usinées et particulièrement l'état de surface et la résistance aux déformations [17].

Dans cet article nous étudions l'influence des paramètres du régime de coupe au cours du fraisage (surfaçage) sur la tenue en service de l'outil fraise pour les plaquettes en carbure P35 non revêtues et revêtues d'une couche de nitrure de titane par dépôt (PVD). Nous proposerons également des modèles mathématiques prédictifs qui expriment les relations de la durée de vie T et de la rugosité arithmétique R_a en fonction de la vitesse de coupe V , l'avance par dent f_z , et la pénétration radiale a_p .

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Pour augmenter la fiabilité des résultats et de satisfaire le caractère complexe et aléatoire du processus de coupe, les essais ont été réalisés d'après la méthode classique de longue durée, associée à celle de planification des expériences [11].

2.1 Equipements utilisés

2.1.1 Machine-outil

La machine outil est une fraiseuse verticale, de marque soviétique modèle 6H11, ayant une puissance sur la broche de 4,5 kW, (fig. 1).



Figure 1. Fraiseuse verticale, modèle 6H11

2.1.2 Matière usinée

Les éprouvettes des essais (fig. 2) sont en acier C18 pour traitements thermiques. La composition chimique et les caractéristiques mécaniques de cet acier sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Composition chimiques et caractéristiques mécaniques de l'Acier C18.

Composition Chimique					Caractéristiques Mécaniques		
C	Si	P	Cr	V	HRB	Rm, MPa	L,%
0,18	0,174	0,05	0,035	Traces	77	60	10

2.1.3 Outil de coupe

L'outil de coupe utilisé (fig. 3) est une fraise à surfacer de 100 mm de diamètre, ayant huit dents en carbure métallique de nuance ISO P35. Elle a respectivement la géométrie et les désignations ISO sont les

suivantes: $\phi_0=11^\circ$, $\phi_0 = 3^\circ$, $r_r = 75^\circ$ et SPMR 12 03 08, (pour les plaquettes non revêtues) et SPMR 12 03 12, (pour les plaquettes revêtues).



Figure 2. Epreuves d'essai en acier C18

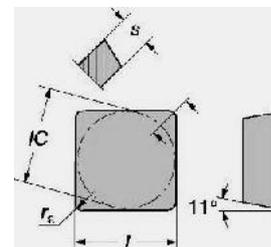
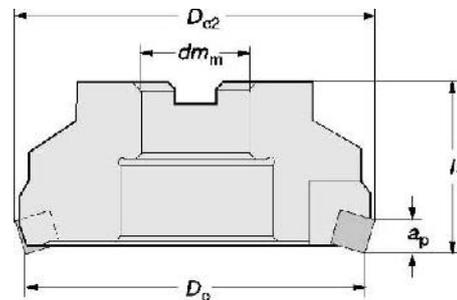


Figure 3. Détails de l'outil fraise et de la plaquette.

2.1.4 Appareil de mesure de l'usure

Pour mesurer l'usure des dents de la fraise, un microscope optique d'atelier modèle MMN-2 ayant une précision de mesure de l'ordre de 5µm (fig. 4) a été utilisé. L'appareil est équipé d'un dispositif spécial porte fraise permettant le contrôle des plaquettes de la fraise sans nécessité de démontage des plaquettes.

2.1.5 Appareil de mesure de l'état de surface

La rugosité de la surface usinée a été mesurée avec un rugosimètre de marque japonaise modèle Surf test III 178 (fig.5) ayant deux vitesses de déplacement 2mm/sec et 6mm/sec et doté d'un système à palpeur inductif.

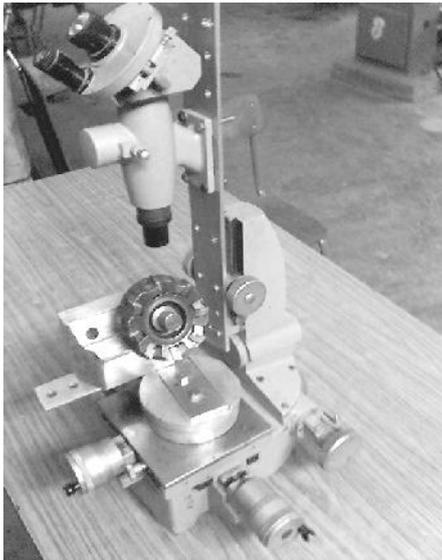


Figure 4. Microscope optique modèle MMN-2



Figure 5. Rugosimètre Surf test III 178.

2.2 Conditions de coupe

Pour quantifier l'effet des conditions de travail sur les paramètres technologiques étudiés nous avons varié les éléments du régime de coupe dans les intervalles

suivants :

$V = (60 \div 150)$ m/min ; $f_z = (0,02 \div 0,2)$ mm/dent, $a_p = (1 \div 2,5)$ mm et une valeur constante $a_e = 98$ mm

Les essais ont été effectués à sec.

La valeur de l'indice d'usure admissible VB retenue selon la norme ISO est 0,35mm.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats de l'usure de la fraise

Les essais d'usinage sont réalisés conformément à un plan d'expériences comportant 3 paramètres (V , f_z , a_p) ayant chacun 2 niveaux et 8 sites expérimentaux. Le résultat étudié ici est l'usure. La valeur retenue est la hauteur de l'usure en dépouille moyenne mesurée pour chaque plaquette de la fraise.

3.1.1 Traitement graphique de l'usure des plaquettes

Les résultats du suivi temporel de l'usure moyenne des dents de la fraise pour différentes combinaisons du régime de coupe sont exprimés graphiquement par les figures 6 et 7. Le traitement graphique de ces résultats a permis la détermination des tenues (tab. 2). Le traitement statistique des résultats fournis dans le tableau 2 a permis la déduction des modèles mathématiques (1) et (2) respectivement pour les plaquettes non revêtues et revêtues. Ces modèles expriment la relation entre les paramètres de sortie durée de vie T (en min.) et les paramètres d'entrée (V , f_z , a_p). L'adéquation de ces modèles est exprimée par le coefficient de corrélation global $R=0,959$.

$$T = \frac{e^{6.432}}{V^{0.984} f_z^{0.901} a_p^{0.082}} \quad (1)$$

Tableau 2. Tenues en fonction des différentes combinaisons du plan des expériences

N° Essais	Paramètres d'entrée						Paramètres de sortie Tenue T, mn	
	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Plaquettes	
	X ₁	X ₂	X ₃	V	f _z	a _p	Non revêtues	Revêtues
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	490	1400
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	90	575
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	45	215
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	30	120
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	370	1250
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	220	360
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	45	230
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	22	80

$$T = \frac{e^{8.544}}{V^{0.977} f_z^{0.704} a_p^{0.376}} \quad (2)$$

3.1.3 Evolution de l'usure propre à chaque dent de la fraise

Au cours des essais, nous avons relevé la valeur de l'usure de la face de dépouille propre à chaque dent (plaquette) de la fraise. Les figures (8 et 9) montrent l'évolution de l'usure propre à chaque dent non revêtue de la fraise en fonction du temps pour deux régimes de coupe différents. Les figures (10 et 11) montrent l'évolution de l'usure propre à chaque dent revêtue de l'outil.

Un microscope électronique à balayage permet d'avoir les photographies des plaquettes figures (12-16) pour suivre l'évolution de l'usure et d'étudier sa morphologie.

3.2 Résultats de la rugosité de la surface usinée

Le tableau 3 montre les différentes valeurs de la rugosité arithmétique Ra de la surface usinée pour les huit combinaisons du régime de coupe pour les plaquettes non revêtues et revêtues ayant respectivement le rayon du bec égal à

0,8mm et 1,2mm. Le traitement statistique de résultats permet la déduction du modèle mathématique (3), exprimant la relation entre la rugosité et (V, f_z, a_p). L'adéquation de ces modèles est exprimée par le coefficient de corrélation global qui est en l'occurrence R= 0,976.

$$Ra = \frac{e^{4.309} f_z^{0.295} a_p^{0.142}}{V^{0.557}} \quad (3)$$

$$Ra = \frac{e^{7.194} f_z^{0.962} a_p^{0.479}}{V^{0.850}} \quad (4)$$

3.3 Influence de l'usure sur la qualité de la surface usinée

Au cours des essais d'usinage nous avons procédé au suivi de l'évolution de l'état de surface en fonction de l'accroissement de l'usure. La figure 17 montre l'évolution de la rugosité de la surface usinée en fonction du temps d'usinage pour le régime de coupe de finition (régime 2), pour les deux nuances de plaquettes testées.

4. ANALYSE DES RESULTATS

L'analyse des courbes d'usure (fig. 6 et 7) et des valeurs de la tenue (tab. 2), montre

que la vitesse de coupe a l'influence la plus marquée sur l'usure, suivi par l'avance et enfin la profondeur de passe. Ce degré d'influence est quantifié par les valeurs absolues des exposants du modèle mathématique (1) [9].

Avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance, la température dans

la zone de coupe augmente ce qui accélère le processus de l'usure. Par conséquent la tenue diminue [10]. La faible influence de la profondeur de passe s'explique par le fait qu'avec l'augmentation de celle-ci la surface de contact entre l'outil et la pièce s'accroît ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur de la zone de coupe.

Tableau 3. Rugosité Ra en fonction des différentes combinaisons du plan des expériences.

N° Essais	Paramètres d'entrée						Paramètres de sortie Rugosité Ra μm	
	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Plaquettes	
	X ₁	X ₂	X ₃	V	f _z	a _p	Non revêtues	Revêtues
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	2,5	1,025
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	1,42	0,583
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	3,81	6,56
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	2,9	1,818
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	2,6	0,765
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	1,505	0,610
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	5,2	7,236
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	3,25	5,14

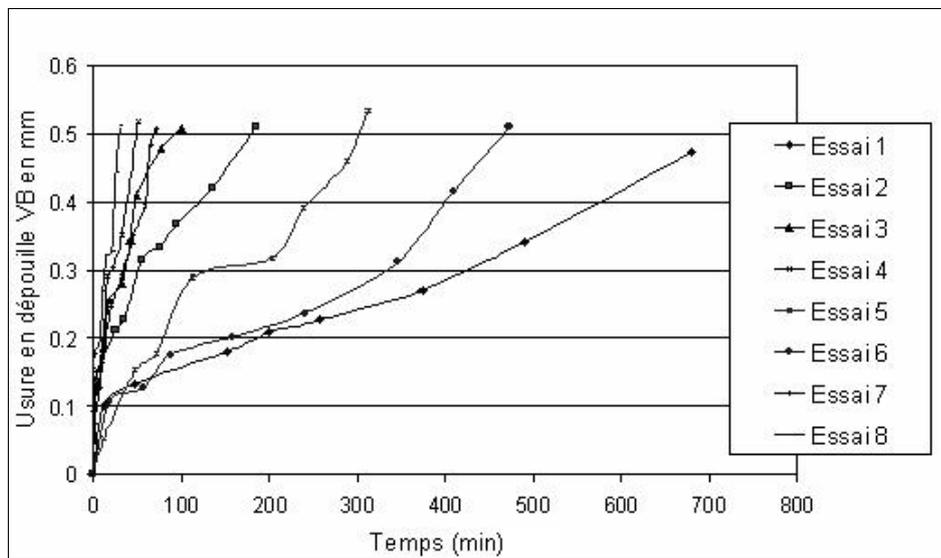


Figure 6. Evolution de l'usure VB moyenne en fonction du temps pour les huit régimes de coupe (plaquettes en carbure P35 non revêtues)

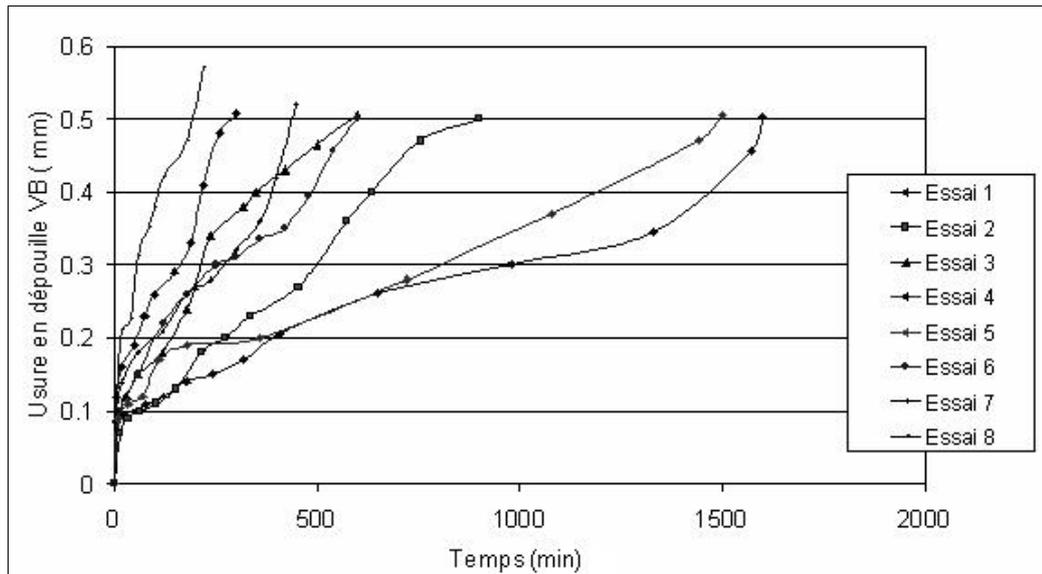


Figure 7. Evolution de l'usure VB moyenne en fonction du temps pour les huit régimes de coupe (Plaquettes en carbure P35 revêtues)

L'analyse des graphes représentant l'usure en fonction du temps des plaquettes de la fraise pour les huit régimes de coupe conformément au plan des expériences montre d'une manière générale la même tendance. L'analyse de l'usure propre à chaque dent (fig. 8-11) fait apparaître que les dents de la fraise s'usent d'une manière différente bien qu'elles travaillent dans les mêmes conditions. Pour les régimes forts (vitesse de coupe et avance élevée), nous avons remarqué la disparition accidentelle de la partie active à cause du détachement de petits morceaux situation appelée ébréchure [2,9,12].

Cet état de faits n'est pas inédit la nuance de carbure métallique P35 présente un certain degré de fragilité relative [2,12]. En fraisage les dents travaillent en présence de chocs, pour les régimes de coupe sévères nous avons enregistré la rupture du bec de certaines plaquettes. De manière générale, les revêtements à base de nitrure de titane (TiN) donnent une meilleure résistance à l'usure [9]. Dans nos tests les carbures P35 revêtus simple couche de nitrure de titane donnent de meilleurs résultats du point de vue

résistance à l'usure. En effet lors de l'usinage de l'acier C18, les tenues des plaquettes revêtues sont environ quatre fois plus grandes que celles non revêtues. Ceci notamment pour les régimes où les vitesses de coupe sont élevées et les profondeurs de passes sont faibles. Pour les régimes à faibles vitesses ($V=60\text{m/min}$), les plaquettes en carbures revêtus permettent des valeurs de tenue importantes ce qui favorise leur emploi pour les opérations d'ébauche et de semi finition. Les résultats obtenus dans cette étude sont confirmés également dans les travaux [3-5]. L'analyse des photographies de l'usure prises sur le microscope électronique à balayage montre que lors du fraisage dans les conditions d'usinage citées, l'usure de la face d'attaque n'a pas eu lieu. Sur cette surface on observe simplement l'adhésion de certains morceaux du copeau. Par contre sur la face en dépouille l'usure se manifeste par une bande non uniforme et d'une profondeur variable et arbitraire. L'examen révèle en outre que l'usure des plaquettes est accompagnée d'écaillage provoqué par l'adhésion du copeau sur la surface de dépouille (fig. 12-15)

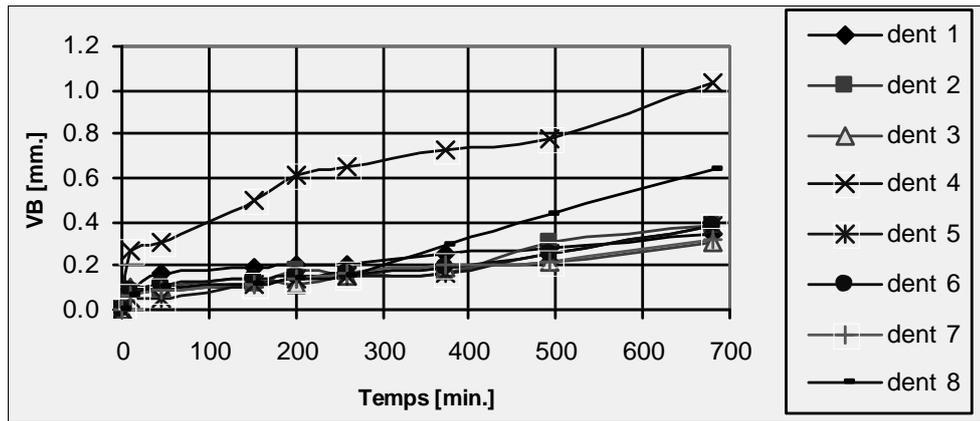


Figure 8. Evolution de l'usure individuelle des huit plaquettes non revêtues de la fraise (Essai 1 : $V=60\text{m/min}$, $f_z=0,02\text{mm/d}$, $a_p=1\text{mm}$, $a_e=98\text{mm}$)

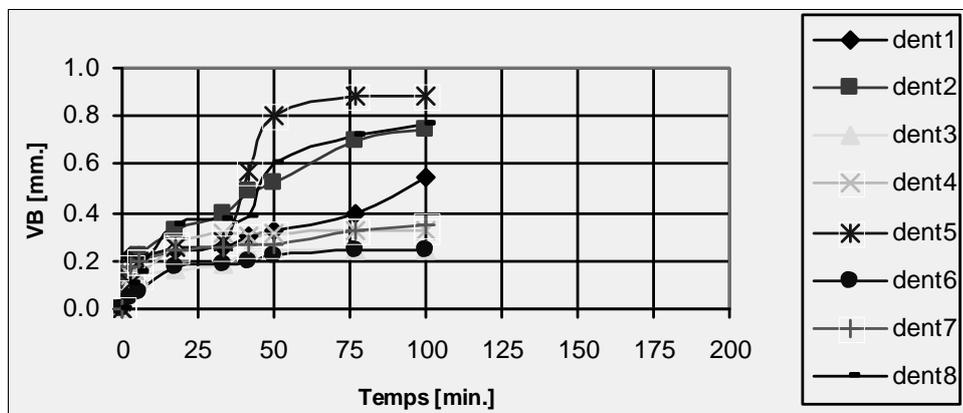


Figure 9. Evolution de l'usure individuelle des huit plaquettes non revêtues de la fraise (Essai 3 : $V = 60\text{m/mn}$, $f_z=0,2\text{mm/d}$, $a_p=1\text{mm}$, $a_e=98\text{mm}$)

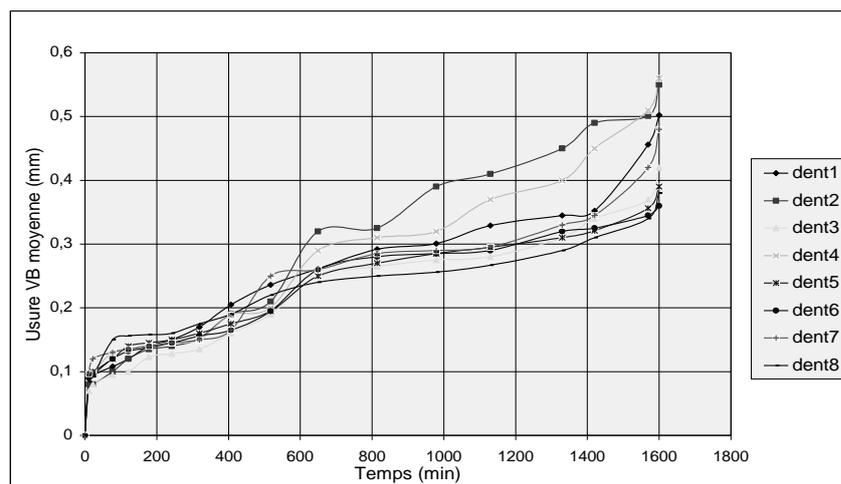


Figure 10. Evolution de l'usure individuelle des huit plaquettes revêtues de la fraise (Essai 3 : $V=60\text{m/min}$, $f_z=0,2\text{mm/d}$, $a_p=1\text{mm}$, $a_e=98\text{mm}$)

L'analyse des résultats de la rugosité arithmétique Ra de la surface usinée de

chaque palier de l'éprouvette pour les différentes combinaisons du régime de

coupe, montre que la valeur de la rugosité la plus faible est obtenue au cours de l'expérience 2 avec les paramètres, $V=150\text{m/min}$, $f_z = 0,02\text{mm/d}$, $a_p= 1\text{mm}$. Cela est en parfaite conformité avec la littérature [9,15,16]. L'analyse de l'aspect micrographique de la surface usinée par le fraisage de face montre que les surfaces fraisées présentent des sillons (trajectoires décrites par l'arête tranchante et le bec de la dent). Plus la distance entre les sillons est faible, (avance par dent faible) plus

l'aspect micrographique de la surface usinée est lisse. Lorsque l'avance par dent augmente pour une même vitesse de coupe, la distance entre les sillons laissés par le passage des dents de la fraise devient plus importante, l'état de surface se trouve ainsi dégradé. Les plaquettes avec un rayon du bec $r = 1,2\text{mm}$ donnent un état de surface meilleur que celui obtenu par les plaquettes ayant le rayon $r=0,8 \text{ mm}$.

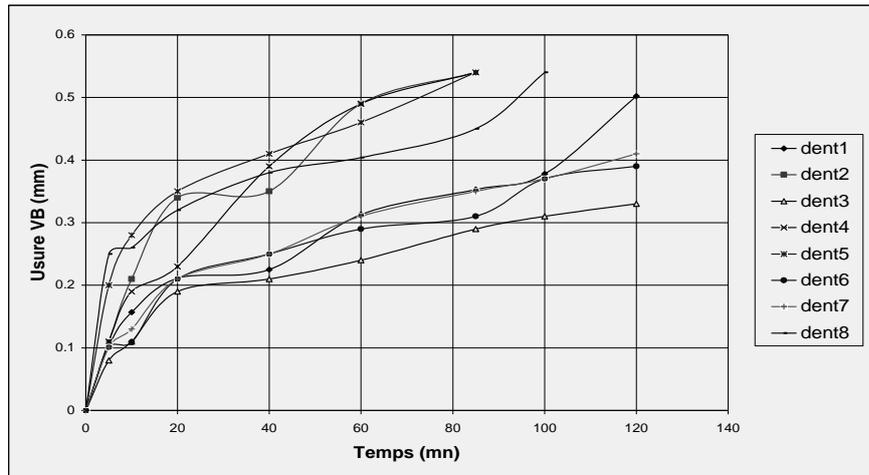


Figure 11. Evolution de l'usure individuelle des huit plaquettes revêtues de la fraise (Essai 8 : $V=150\text{m/min}$, $f_z=0,2\text{mm/d}$, $a_p=2,5\text{mm}$, $a_e=98\text{mm}$)

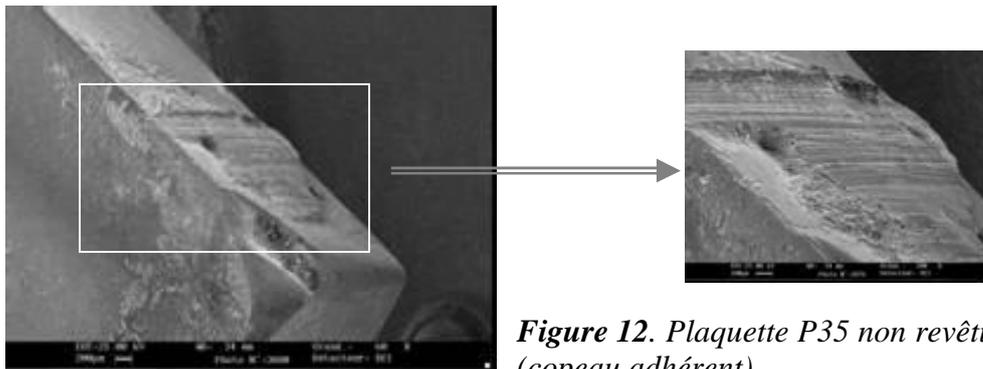


Figure 12. Plaquette P35 non revêtue (copeau adhérent)

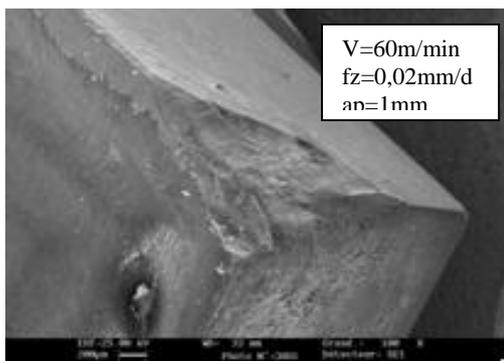


Figure 13. Usure en dépouille de la plaque non revêtue

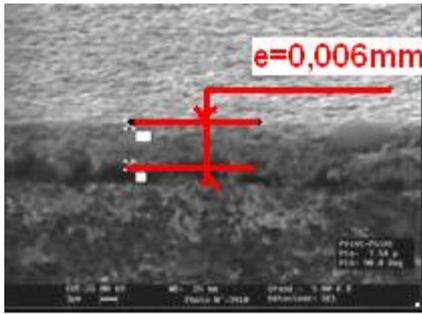


Figure 14. Epaisseur du revêtement TiN

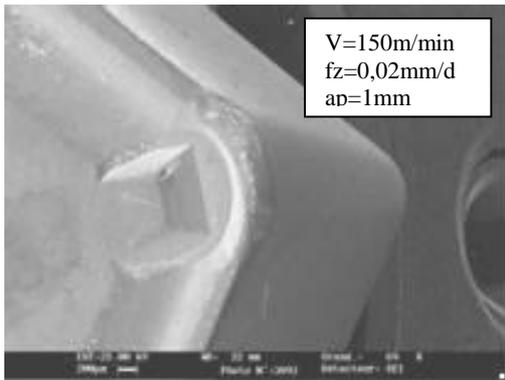


Figure 15 : Amorçage de l'usure sur le bec revêtu

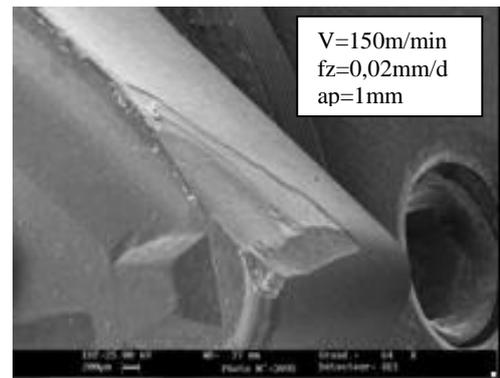


Figure 16 : Usure en dépouille après 300 min de travail avec plaquette

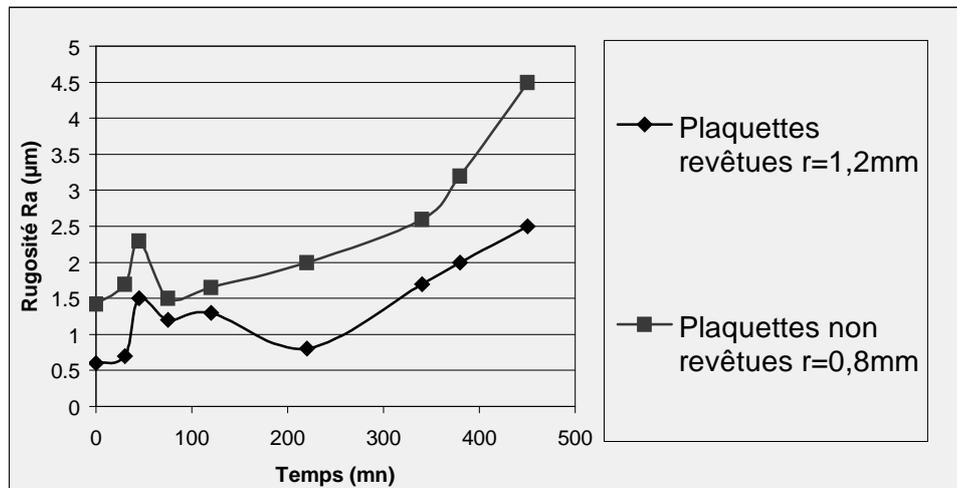


Figure 17. Influence du temps d'usinage sur la rugosité de la surface usinée carbure revêtu et non testées avec ($V= 150\text{m/min}$; $f_z= 0,02\text{mm/dent}$; $a_p= 1\text{mm}$, $a_e=98\text{mm}$)

5. CONCLUSION

L'étude expérimentale a permis l'établissement de l'évolution de l'usure VB moyenne pour une fraise tourteau à 8 dents pour l'usinage d'un acier ISO C18 de résistance mécanique $R_m=60\text{MPa}$. La détermination des tenues de la fraise à plaquettes rapportées en carbure P35 non

revêtues et revêtues de TiN en fonction des paramètres du régime de coupe V , f_z , a_p . Les modèles mathématiques exprimant la tenue en service des plaquettes et la rugosité arithmétique Ra en fonction des paramètres de coupe sont importants pour l'établissement des abaques de choix des conditions d'usinage de plus en plus précises. La résistance à l'usure des

plaquettes revêtues en TiN est de quatre fois celle des plaquettes non revêtues. Suite au meilleur comportement à l'usure, les plaquettes revêtues ont données une qualité de surface meilleure que celle obtenue par les plaquettes non revêtues. Malgré le travail dans les mêmes conditions les dents de la fraise s'usent différemment. L'étude menée a montré que les revêtements en nitrure de titane sur les plaquettes ISO P35 permettent d'augmenter considérablement la durée de vie de l'outil fraise. Ce revêtement contribue également à l'amélioration de l'état de surface et particulièrement pour les régimes à grande vitesse V et faible avance par dent f_z .

PERSPECTIVES : Cette étude est suivie d'une autre qui traitera le comportement de ces nuances à revêtement TiN pendant le fraisage des aciers ISO C45 et ISO 100Cr6. En plus, une étude expérimentale comparative est en cours de réalisation sur les performances en fraisage des plaquettes de coupe à revêtements simple et multicouches.

Références

- [1] Collectifs d'auteurs, *Fraisage, un domaine où l'outil va de plus en plus vite*, Revue périodique, Machine de Production, 1989.
- [2] Lefèbre M., *Fraisage combiné carbure*, CETIM, 1989.
- [3] M. Nordin, M.Larsson, S. Hogmark. *Mechanical and tribological properties of multilayered PVD TiN/CrN, TiN/MoN, TiN/NbN, TiN/TaN coating on cemented carbide*, Surface & Coatings Technology 106, 1998, pp. 234-241.
- [4] U. Wiklund, M. Nordin O. Wanstrand, M. Larsson, *Evaluation of a flexible physical vapor deposited TiC-C coating system*, Surface & Coatings Technology 124, 2000, pp. 154-161.
- [5] M. Nordin, R. Sundstrom, T.I. Selinder, S. Hogmark. *Wear and failure mechanisms of multilayered PVD TiN TaN coated tools when milling austenitic stainless steel*, Surface & Coatings Technology 133-134, 2000, pp. 240-246
- [6] T.I. Selinder, M.E. Sjostrand, M. Nordin, S. Hogmark. *Performance of PVD TiN/TaN and TiN/NbN superlattice coated cemented carbide tools in stainless steel machining* Surface & Coatings Technology 133-134, 2000, pp. 240-246
- [7] B. Roumesy, *Détermination des lois d'usure des outils de coupe*, Machines-outils, Juillet 1975.
- [8] B. Roumesy, C. Bedrin, *Usinabilité et coupe des métaux*, Revue Matériaux et Techniques, Août/sept., 1981.
- [9] M. A. Yallese, Rigal J.-F., L. Boulanouar, *The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60 HRC)*. J. Eng. Manufact., 2005.
- [10] M. A. Yallese, L. Boulanouar, K. Chaoui, *Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique*, Revue Mécanique et Industries, 2004, N°5, 355-368
- [11] L. Boulanouar, *Modélisation statistique pour la détermination de l'usinabilité des aciers difficilement usinables*, Thèse Doctorat, 200 p., Sofia, 1986.
- [12] L. Boulanouar, M. Khechana et S. Belhadi, *Comportement à l'usure des plaquettes en carbure métallique P25, face à l'acier XC30*, 4ème séminaire National de Mécanique, ENSET d'Oran, 25 et 26 Avril 1995.

- [13] N. Camuscu, E. Aslan, A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel. *J. Materials Processing Technology*, 170 (2005) 121-126.
- [14] J. A Ghani, I. A. Choudhury, H. Hassan, *Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters*, *J. Materials Processing Technology*, 145 (2004) 84-92.
- [15] W. Bouzid, A. Zghal, L. Sai, *Optimisation de la rugosité des surfaces usinées*, *Revue de mécanique appliquée et théorique*. Vol. 1.5 (2003) 341-356.
- [16] I. Korkut, M.A. Donertas, *The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling*. *Materials and Design* 28 (2007) 308–312
- [17] F. Bagur, *Matériaux pour outils de coupe, conditions générales de coupe en fraisage*, *Techniques de l'Ingénieur*, BM 7080-1, 2005.