



ENDOMMAGEMENT DES OUTILS DE COUPE EN CERAMIQUE (Al_2O_3+TiC) ET EN CBN LORS DE L'USINAGE DE L'ACIER TREMPÉ X200Cr12

M. A. YALLESE, S. BELHADI,

Laboratoire mécanique et structure (LMS), Université de Guelma, E-mail: yalèse@yahoo.fr.

L. BOULANOUAR

Laboratoire mécanique des matériaux et maintenance industrielle (LR3MI), Université Annaba.

Résumé :

Dans ce travail, sont exposés les résultats d'une étude expérimentale relative à l'usinage de l'acier trempé X200Cr12 avec la céramique mixte à base d'alumine (Al_2O_3+TiC) et le Nitrure de Bore Cubique CBN. La première série des essais est consacrée au suivi de l'évolution de l'usure et aussi l'étude de l'influence de la vitesse de coupe sur la tenue de l'outil. La deuxième série traite le suivi de la dégradation de la qualité de surface en fonction de l'évolution de l'usure des deux outils à différentes vitesses de coupe. Lors de l'usinage de cet acier, le CBN s'est montré très résistant à l'usure malgré l'agressivité de l'acier usiné. Les états de surface obtenus sont comparables à ceux obtenus en rectification ($0.2\mu m < Ra < 1.6\mu m$). La surface usinée n'a pas été affectée thermiquement malgré la grande quantité de chaleur dégagée. Les résultats obtenus ont permis la détermination de deux modèles mathématiques, le premier est celui de l'usure qui exprime la relation entre la durée de vie et la vitesse, le second est le modèle de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille (VB).

Mots clés :

Usinage - Usure - Rugosité - Durée de vie - Nitrure de Bore Cubique - Acier.

Abstract :

In this paper, are exposed the results of an experimental study relating to the machining of the hardened steel X200Cr12 with mixed ceramics based on alumina (Al_2O_3+TiC) and the cubic boron nitride CBN. The first series of the tests is devoted to the study of the influence cutting speed on the tool-life. The second series treats the degradation of the surface quality as fonction of evolution of the tool material'wear. During the machining of this steel, the CBN is shown very resistant to wear in spite of the aggressiveness of machined steel. Surface qualities obtained are comparable with those obtained in grinding (0.2

$\mu m < Ra < 1.6 \mu m$). The machined surface was not affected thermally in spite of the great quantity of released heat. In the interval of admissible wear, the machining system was characterized by a good stability. the results obtained allowed the determination of two mathematical models, the first is the model of de CBN tool wear which expresses the relation between the tool life and the cutting speed, the second is the model of roughness according to flank wear (VB).

Key words :

Machining - Wear - Roughness - tool Life - Cubic Boron Nitride - Steel.

1. Introduction :

Dans la concurrence du marché, la production industrielle doit perfectionner ses méthodes d'usinage en travaillant soit avec une production maximale ou avec un coût minimal. Il arrive parfois que ce dernier passe au second plan et que seule la production maximale importe, on choisira alors une Vc supérieur et le matériau de coupe adéquat. Plus la Vc croit, plus les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent [1, 2, 3]. Le frottement et les pressions élevées qui s'exercent à l'interface copeau / outil provoquent l'usure [4, 5, 6]. Dans le cas des matériaux durs, l'usure des outils de coupe arrive au premier plan car elle influe fortement sur l'obtention d'un état de surface correct et de la forme désirée dans la précision recherchée [7, 8, 9, 14]. Notre étude s'inscrit dans ce cadre, les essais réalisés ont pour vocation d'amener les entreprises de la mécanique à mieux appréhender les potentialités techniques et surtout économiques de l'usinage des pièces très durs avec les matériaux de coupe modernes (Céramiques et CBN). Des potentialités qui se traduisent par des gains de productivité importants



et par conséquent par des avantages décisifs en terme de compétitivité.

2. Procédure expérimentale :

Les essais ont été réalisés conformément aux essais d'usure de longue durée [Norme ISO 36 85] et cela pour évaluer la tenue des deux outils utilisés (céramique CC650 et CBN7020) à différentes vitesses de coupe. Les équipements utilisés ainsi que les conditions de coupe sont comme suit :

2.1 Equipements utilisés

- Machine-outil : Tour rigide (TOS TRENCIN) modèle SN40, avec une puissance $P=6,6Kw$.

- Outil de coupe : Les porte-plaquettes utilisés sont du type CSBNR2525M12 et PSBNR2525K12 et ils ont la géométrie suivante : $\chi_r = 75^\circ$, $\gamma = -6^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$.

- Plaquettes : Les plaquettes utilisées sont amovibles de désignation (SNGN 120408) avec inserts en coin pour le CBN7020 et de composition chimique (57% CBN+35% TiCN+8% autres). La céramique mixte CC650 utilisée est massive avec une composition chimique de (70% Al_2O_3 + 30% TiC).

- Appareil de mesure : Pour la mesure de l'usure nous avons utilisé un microscope optique type (HUND,W-AD) équipé d'une camera CCD (Photo. 1). La mesure de la rugosité a été réalisée par un rugosimètre SurfTest 301 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante de profil de rugosité (Photo. 2).

- Matériau à usiner : Nous avons usiné des éprouvettes en acier trempé X200Cr12 de diamètre extérieur $D = 80mm$ et de longueur $L=350mm$, ayant la composition chimique mentionné dans le (Tableau 1). Cet acier a subi un traitement thermique de trempé et revenu, ce qui a permis d'augmenter sa dureté de 250 HB à 60HRC. Grâce à sa haute résistance à l'usure, il est utilisé pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filière d'étirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois, peigne à rouler les filets, etc..... [10, 11].

2.2 Conditions de coupe

Les essais sont effectués d'après la méthode univariée à sec. Les valeurs de la vitesse de coupe en tant que facteur variable ainsi que les autres paramètres sont prises comme suit :

- V_c --- CC650 : [60 - 90 - 120] m/min.

- V_c ----CBN7020 : [90-120-180-280-350] m/min.

- Profondeur de passe et avance : $a_p = 0,5 mm$; $f = 0,08 mm/tr$.

- Usure admissible en dépouille et en cratère :
[VB] = 0,3 mm, [KT] = 0,15 mm.

3. Résultats des expériences :

3.1 Evolution de l'usure en fonction du temps

Les essais effectués ont permis le suivi de l'usure en dépouille (VB) et en cratère (KT) en fonction du temps à différentes vitesses de coupe. Les figures (1 à 4), illustrent l'évolution des différentes usures de l'outil en céramique CC650 et le CBN7020, face à l'acier trempé X200Cr12.

3.2 Influence de l'usure sur la rugosité

Les résultats des essais de l'étude de l'influence de l'usure des deux outils étudiés sur l'état de surface de l'acier X200Cr12 à différentes vitesses sont représentés sur les figures (5 à 10).

4. Traitement des résultats :

4.1 Détermination de la durée de vie

Le traitement graphique des résultats de l'usure en dépouille (VB) en fonction du temps (fig 1 et 3), a permis la détermination des tenues des deux outils utilisés à différentes vitesses de coupe. Ainsi leurs valeurs sont mentionnées dans le (Tableau 2).

4.2 Détermination du modèle de l'usure

Le traitement des résultats de la tenue d'après la méthode des moindres carrés, a permis la détermination des constantes du modèle de l'usure (Modèle de Taylor) (Tableau 3).

4.3 Détermination du modèle de la rugosité

Le traitement des résultats expérimentaux obtenus aux figures (5 à 10), a permis la détermination des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre la rugosité et l'usure en dépouille (VB) pour les deux outils utilisés à différentes vitesses de coupe (Tableau 4).

5. Analyse et discussion des résultats :

- Lors de l'observation de l'endommagement de la céramique CC650 à la vitesse 60 m/min, l'usinage de l'acier X200Cr12 se fait sans beaucoup de difficulté, l'usure sur la face en dépouille est régulière, l'usinage est très stable et l'état de surface est d'une qualité comparable à celui obtenu en rectification. Quand

l'usure (VB) atteint la valeur de 0.3mm après 82min de travail, l'usinage reste toujours stable, le copeau est fragmenté de couleur rouge et l'état de surface est excellent $Ra=0.65\mu m$ (Photo. 3). A la vitesse 90 m/min l'usure de la céramique CC650 évolue à un rythme accéléré, l'outil atteint la valeur de l'usure admissible après 10min d'usinage ce qui correspond à une rugosité $Ra=0.76\mu m$ (Photo. 4). A la vitesse de 120 m/min les sollicitation mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent et conduisent à une usure rapide, l'usinage devient instable et le copeau obtenu est rouge vive. On remarque des écaillages sur l'outil, qui conduisent à l'effondrement du bec après 4 min de travail (Photo. 5).

- Durant le suivi du mode de l'endommagement de l'outil de coupe CBN aux vitesses de coupe [90 - 120 -180] m/min, l'usinage est caractérisé par une stabilité, pas d'écaillage de la plaquette CBN sur la surface en dépouille et en cratère, le copeau obtenu est fragmenté de couleur rouge. L'usure (VB) se manifeste par l'apparition d'une bande régulière, avec l'augmentation du temps de coupe la valeur de (VB) augmente et on remarque un élargissement des dimensions du cratère. A la fin de l'usinage, l'usure (VB) devient irrégulière avec l'apparition d'un petit effondrement du bec de l'outil à cause de l'usure combinée de (VB) et (KT) (Photos 6 à 8). Cette usure mérite par conséquent une attention particulière puisqu'elle affecte l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce.

- Aux grandes vitesses de coupe [280-350] m/min et après quelques minutes de travail, l'usinage devient instable. Il s'accompagne par l'apparition des vibrations, des étincelles et l'écoulement d'un copeau rouge. Ce qui rend l'usinage par la suite presque impossible. Cette observation conduit à limiter la plage des vitesses de coupe utilisées lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 à 60HRC. En effet, les vitesses de coupe supérieures à 280 m/min sont peu recommandées à cause de l'usure rapide de l'outil qui entraîne une durée de vie très courte de celui-ci, ce qui n'est pas intéressant sur le plan industriel.

- L'analyse des résultats montre que l'influence de la vitesse de coupe est significative. En effet, l'augmentation de cette dernière entraîne une nette diminution de la tenue des deux outils testés. Sur le plan industriel, les conséquences de l'augmentation de la vitesse de coupe conduisent aux rapports des tenues (Tableau 5).

- L'analyse comparative des tenues, obtenues par ces deux matériaux de coupe aux même vitesses, montre que la durée de vie du CBN est 4,4 fois supérieure à celle de la céramique CC650 à la vitesse de 90 m/min et de 8,15 fois à la vitesse de 120 m/min. on remarque d'après cette comparaison que plus la vitesse augmente plus l'écart entre les tenues devient grand. L'explication de cette supériorité réside dans le fait que le CBN se caractérise par la haute rigidité et la tenue exceptionnelle de ses arêtes, ainsi que par sa dureté accrue et sa stabilité chimique aux températures élevées. C'est pourquoi ce nouveau matériau de coupe devient approprié à l'usinage de finition des matériaux durs.

- L'analyse du taux d'augmentation ou diminution de la tenue en fonction de la vitesse, nous renseigne également sur la quantité de copeau produite à différentes vitesses de coupe. Par conséquent nous pouvons dire qu'à la vitesse 90 m/min le CBN produit 3937,5 mètres de copeau, alors que la céramique CC650 n'arrive à enlever que 900 mètres. A la vitesse de 120 m/min le CBN produit 3720 mètres de copeau et la céramique CC650 produit que 456 mètres. De ce fait, il découle que le CBN est plus productif que la céramique CC650.

- L'analyse des résultats de la rugosité en fonction de l'usure de la céramique mixte CC650 et du CBN7020 à différentes vitesses de coupe (figures 5 à 10), montre que l'augmentation de l'usure en dépouille VB, entraîne un endommagement de la qualité de la surface usinée. Il faut préciser à ce niveau que, tant que l'usure est régulière et ne dépasse pas la valeur admissible [$VB=0,3\text{ mm}$], la rugosité (Ra) évolue très lentement et l'état de surface demeure bon. Au-delà de cette valeur, la rugosité subit une augmentation relative brusque, mais elle reste fort acceptable. Les qualités de surface obtenues à l'aide du CBN et de la céramique CC650 sont comparables à celles données par la rectification ($0,2\ \mu m < Ra < 1,6\ \mu m$).

- Les modèles mathématiques de l'usure expriment la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie. Ils permettent donc de déterminer, pour des conditions de coupe données la vitesse de coupe à utiliser en fonction de la durée de vie souhaitée. Par contre les modèles mathématiques de la rugosité expriment la relation entre la rugosité (Ra) et l'usure (Vb) de l'outil. Ces modèles sont très utiles pour l'élaboration des abaques et l'optimisation du processus de coupe. Les valeurs des coefficients de détermination de ces modèles sont élevées et convergent vers l'unité, ce qui traduit leur bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

Conclusion :

Les Résultats des essais réalisés dans cette étude débouchent sur les conclusions de ce travail :

1. Le comportement à l'usure varie très largement en fonction de la composition chimique et aux caractéristiques physiques et mécaniques des deux matériaux de coupe testés, ainsi que la nuance du matériau usiné et aussi des conditions de coupe utilisées. Par conséquent le meilleur comportement à l'usure est observé avec le CBN suivi par la céramique CC650.
2. L'usure en dépouille est principalement due à l'abrasion, elle est attribuée aux rapports entre la dureté des composants de l'acier X200Cr12 et celle des composants de la céramique CC650 et du CBN7020.
3. La haute dureté de l'acier X200Cr12 (60HRC) limite l'utilisation de la céramique CC650 à des vitesses de coupe inférieures à 120 m/min et cela à cause des risques de bris et aussi à la durée de vie très courte. Par contre le CBN7020 supporte en effet des vitesses de coupe plus élevées et fournis donc un très bon état de surface des pièces usinées même en dehors de l'intervalle de l'usure admissible. Dans la plage des vitesses [180 à 350] m/min le CBN dépasse de loin la céramique CC650 aussi bien en durée de vie qu'en qualité de surface générée.
4. Grâce à son excellent effet sur la qualité des surfaces usinées, le CBN offre la possibilité d'exécuter des opérations d'ébauche et de finition sur le même poste de travail. Ce qui influe avantageusement sur le cycle de production, le coût de fabrication et sur la précision des pièces usinées.
5. L'endommagement (usure) de l'outil CBN7020 influe sur les valeurs des rugosités, avec l'augmentation de la vitesse de coupe, l'usure des deux matériaux utilisés augmente et conduit directement à la dégradation de l'état de surface. Aux grandes vitesses de coupe, l'effet de

l'usure de l'outil sur la rugosité prédomine celui de la vitesse de coupe.

6. La céramique mixte CC650 est une alternative économique par rapport au CBN7020 quand il s'agit du travail de petite série et unitaire.

Références :

- [1] PASTOR. H, The evolution of cutting tool materials, *Bulletin du cercle d'études des métaux*, N°13, Nov 1996.
- [2] CHANCEL. P, les nouveaux outils coupants, *CETIM information*, N° 147, Fév1996.
- [3] YALLESE. M.A, L. Boulanouar, S. Belhadi, Etude des performances des outils céramiques lors du tournage, *Conférence Internationale sur la Productique CIP'2001*, Alger Juin 2001.
- [4] Boulanouar. L, S. Belhadi et T. Lahreche, Influence de la géométrie sur la durée de vie d'un outil de tour en acier rapide, *Matériaux et techniques* N° 9-10, 1997.
- [5] HUG.J.L, Tournage des métaux durs, *Machine de production*, 1995, pp.17-19.
- [6] KONIG. W, Machining of hard materials, *Annals of the CIRP*, 1984, pp.417-427.
- [7] Kevin.Y et Chris J.Evans, Tool wear mechanism in continuous cutting of hardened tool steels, *Wear* 212 (1997) 59-60.
- [8] BEDRIN. C et ROUMESY. B, usinage par outil coupant, *fascicule 1-2 INSA Lyon*, 1989.
- [9] THIEBAUT. F, Etude de la coupe à grande vitesse des aciers, DEA de production automatisée – LURPA- ENS de Cachan, 1995.
- [10] POULACHON. G, Aspects phénomologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Thèse de doctorat de l'ENSAM de Cluny, Déc 1999.
- [11] BARLIER. C et GIRARDIN. L, *Mémotech Productique*, éditions André CASTEILLA 1986.
- [12] GEISKOPF. F et col, Usinage à grande vitesse, ENS Cachan, LURPA, Déc 1999.
- [13] Kevin . Yet Chris J.Evans, Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting, *Wear* 225-229 (1999) 234-245.
- [14] CETIM, *Les atouts de l'usinage à grande vitesse*, Rapport, 1996.

ENDOMMAGEMENT DES OUTILS DE COUPE EN CERAMIQUE (Al₂O₃+TiC).....

Tableau 1 : Composition chimique de l'acier X200Cr12.

% C	% Mn	% Si	% P	% S	Cu	% Cr	Mo	% Ni
2	0,29	0,31	0,011	0,009	0,162	12	0,124	0,259

Tableau 2 : Tenues du CBN à différentes vitesses de coupe selon deux critères d'usure admissibles.

Matériaux de coupe	Vitesse de coupe V _c [m/min]	Tenue [min]	
		[VB]=0.3 mm	[VB]= 0.4 mm
Céramique Mixte CC650	60	82	98
	90	10	15
	120	3,8	6,9
Nitrure de Bore Cubique (CBN 7020)	90	43,75	53,75
	120	31	37,5
	180	12	14,5
	280	6,25	8
	350	2,25	3

Tableau 3 : Modèles de l'usure (Taylor) sous ses deux formes pour [VB] = 0,3 et 0,4 mm.

Matériaux de Coupe	Modèle de Taylor sous ses deux formes VB=0,3mm	Modèle de Taylor sous ses deux formes VB=0,4mm	R ²
Céramique Mixte CC650	$V T^{0,22} = 157,42$	$V T^{0,26} = 191,12$	0,986
	$T = \exp^{22,67} V^{-4,48}$	$T = \exp^{20,38} V^{-3,88}$	0,984
Nitrure de bore cubique CBN7020	$V T^{0,48} = 586,58$	$V T^{0,49} = 678,75$	0,952
	$T = \exp^{13,33} V^{-2,59}$	$T = \exp^{13,24} V^{-2,0}$	0,964

Tableau 4 : Modèles mathématiques de la rugosité pour [VB]=0,3mm.

Matériaux de coupe	Vitesse de coupe	Modèles mathématiques	R ²
Céramique Mixte CC650	V _c = 60 (m/min)	$Ra = 1,12 VB^{0,68}$	0,902
	V _c = 90 (m/min)	$Ra = 0,92 VB^{0,35}$	0,835
	V _c = 120 (m/min)	$Ra = 1,35 VB^{0,58}$	0,928
Nitrure de bore cubique CBN 7020	V _c = 90 (m/min)	$Ra = 1.60 VB^{0,56}$	0.849
	V _c = 120 (m/min)	$Ra = 2.08 VB^{0,73}$	0.982
	V _c = 180 (m/min)	$Ra = 1.89 VB^{0,64}$	0.903

Tableau 5 : Conséquences de l'augmentation de la vitesse de coupe sur la tenue.

Matériau	Augmentation de la vitesse (m/min)	Rapport des tenues Tv ₁ /Tv ₂
Nitrure de Bore Cubique (CBN7020)	de 90 à 120	1,41
	de 90 à 180	3,64
	de 90 à 280	7
	de 90 à 350	19,44
Céramique CC650	de 60 à 90	8,2
	de 90 à 120	21,57

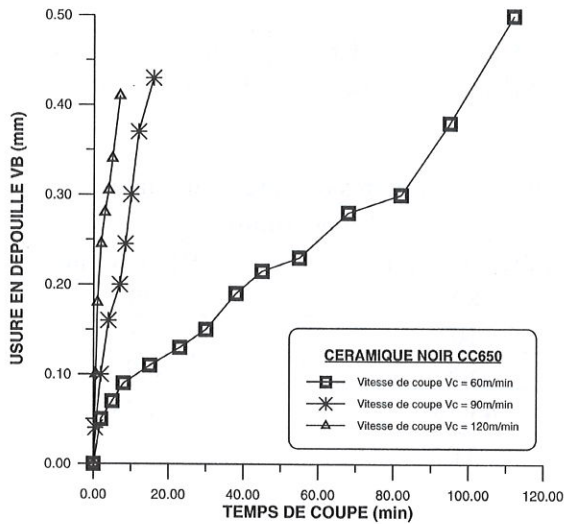


Fig. 1 - Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps.

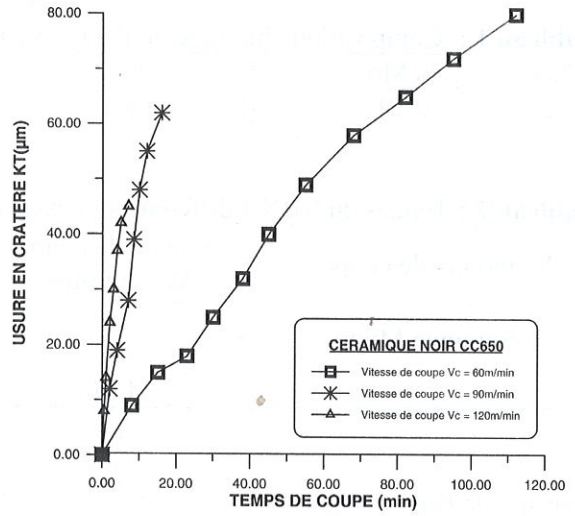


Fig. 2 - Evolution de l'usure en cratère en fonction du temps.

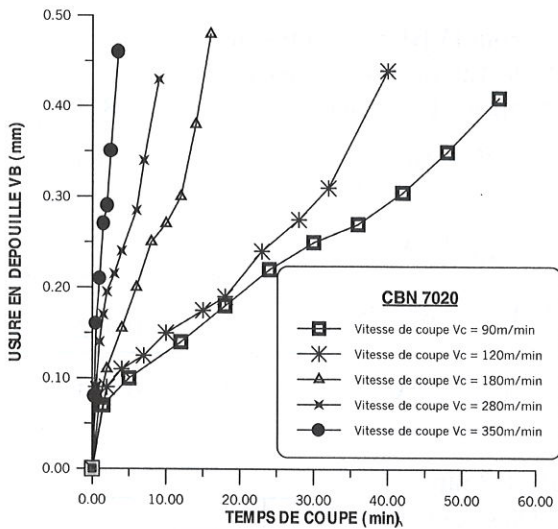


Fig. 3 - Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps.

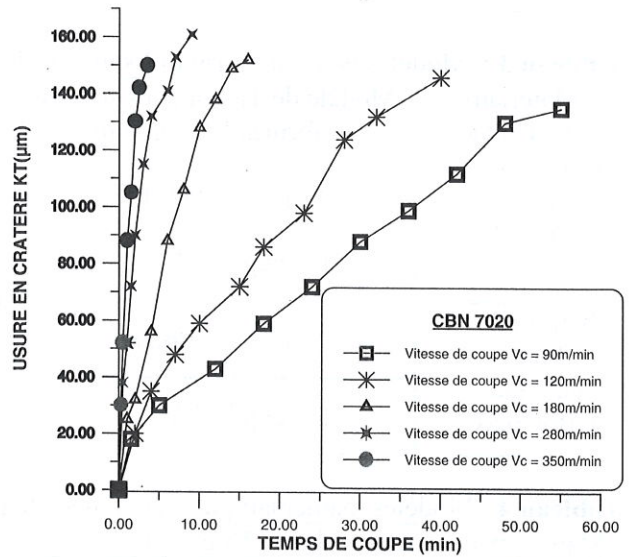


Fig. 4 - Evolution de l'usure en cratère en fonction du temps.

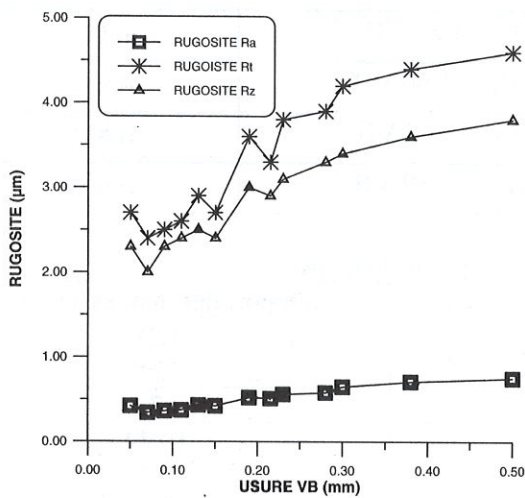


Fig. 5 - Rugosité en fonction de l'usure de la céramique CC650 à Vc = 60m/min.

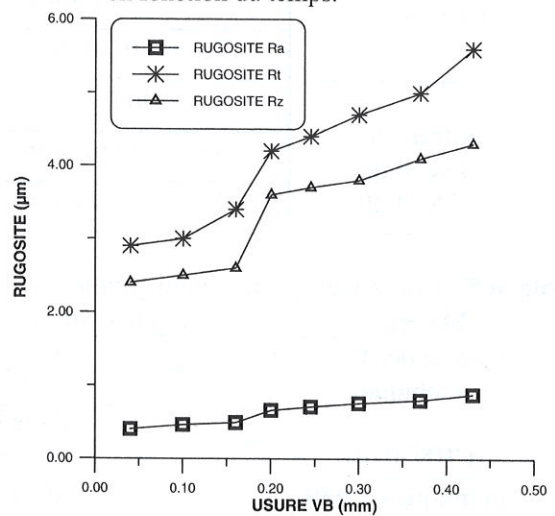


Fig. 6 - Rugosité en fonction de l'usure de la céramique CC650 à Vc = 90m/min.

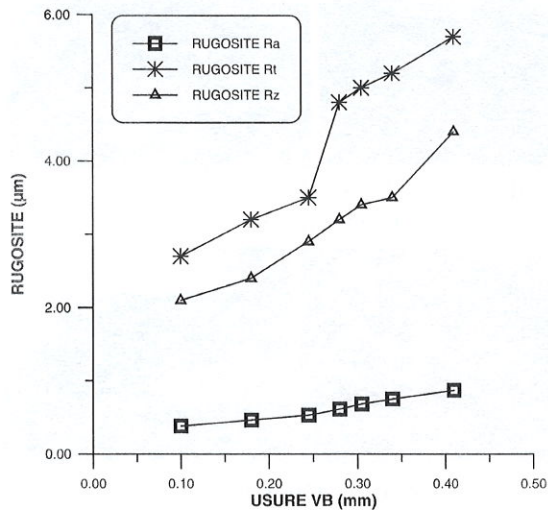


Fig. 7 - Rugosité en fonction de l'usure de la céramique CC650 à Vc = 120 m/min.

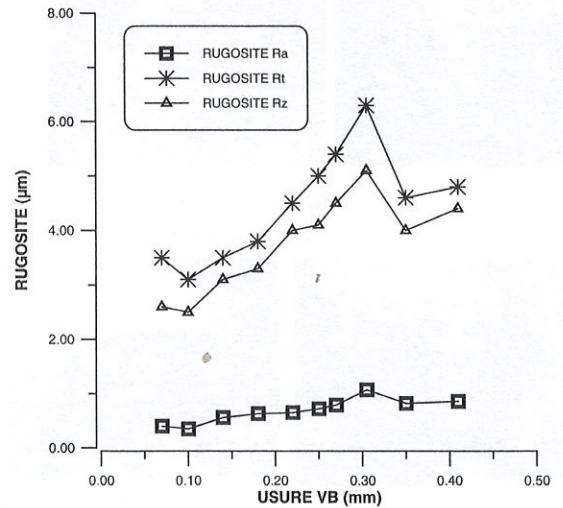


Fig. 8 - Rugosité en fonction de l'usure du CBN7020 à Vc = 90m/min.

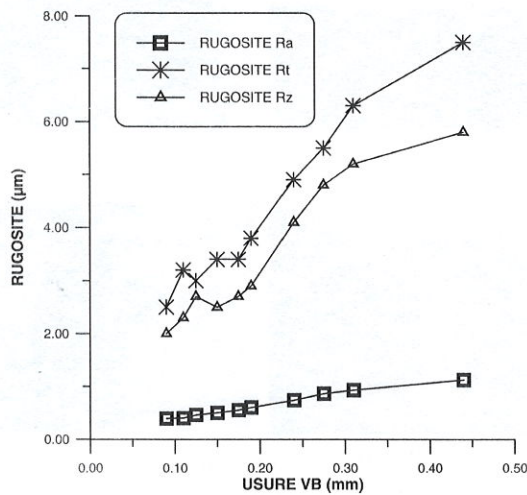


Fig. 9 - Rugosité en fonction de l'usure du CBN7020 à Vc = 120m/min.

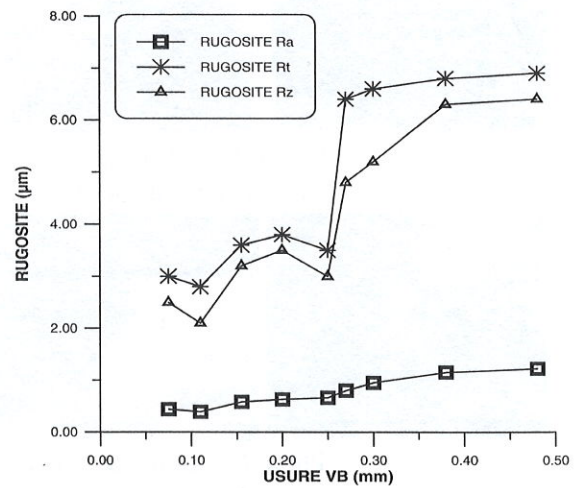


Fig. 10 - Rugosité en fonction de l'usure du CBN7020 à Vc = 180m/min.

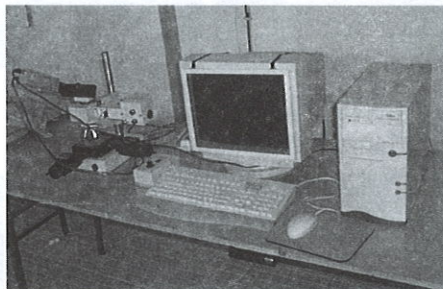


Photo 1 - Microscope utilisé.

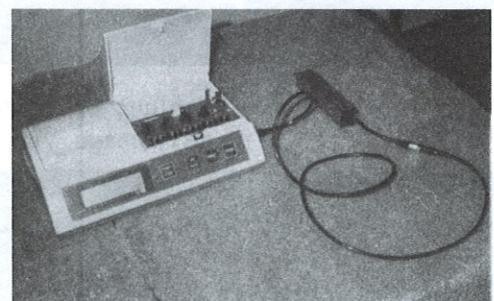


Photo 2 - Rugosimètre utilisé.

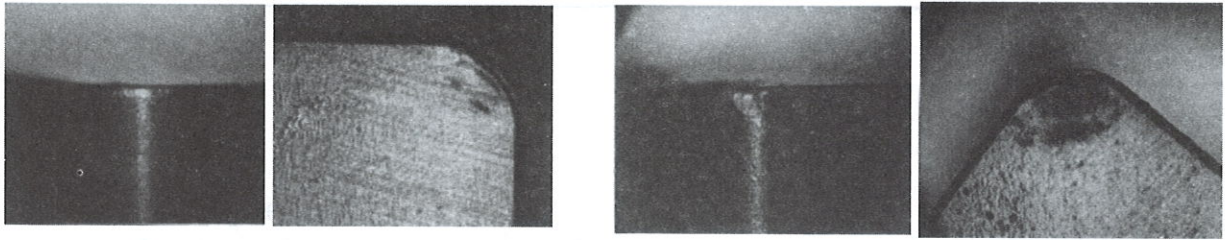


Photo 3 - Allure de l'usure VB et KT de la CC650 au début et à la fin de l'usinage $V_c=60$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.08$ mm/tr.

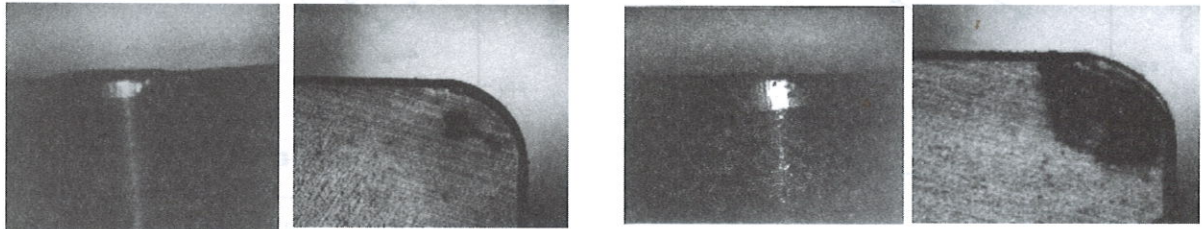


Photo 4 - Allure de l'usure VB et KT de la CC650 au début et à la fin de l'usinage $V_c=90$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.08$ mm/tr.

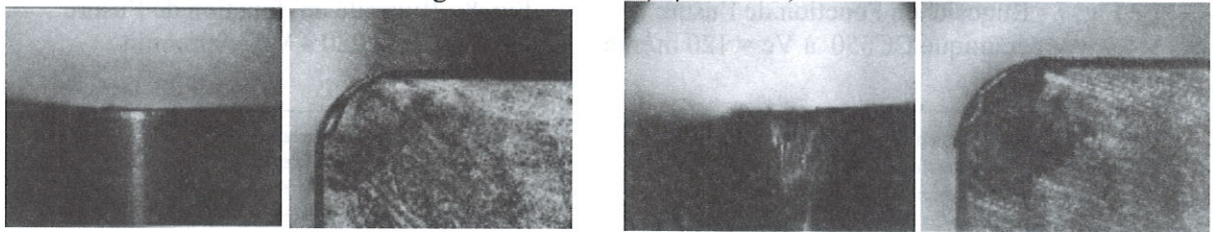


Photo 5 - Allure de l'usure VB et KT de la CC650 au début et à la fin de l'usinage $V_c=120$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.08$ mm/tr.

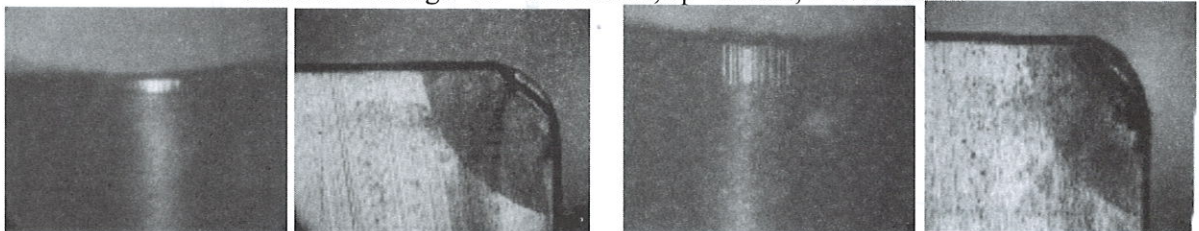


Photo 6 - Allure de l'usure VB et KT du CBN7020 au début et à la fin de l'usinage $V_c=90$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.08$ mm/tr.

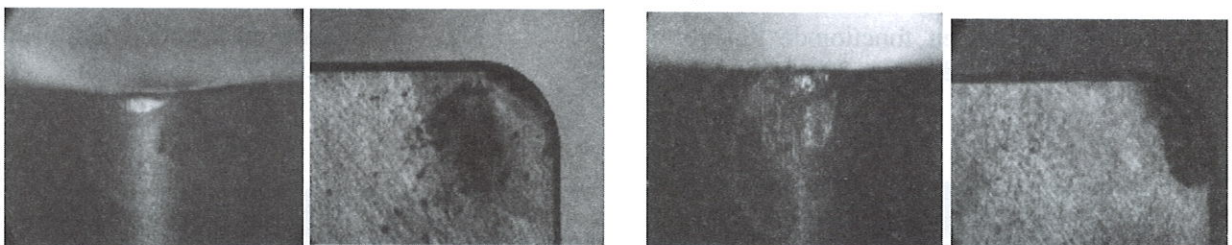


Photo 7 - Allure de l'usure VB et KT du CBN7020 au début et à la fin de l'usinage $V_c=120$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.08$ mm/tr.

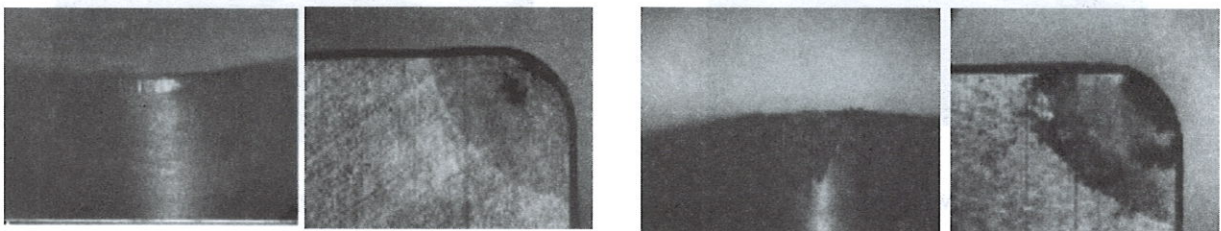


Photo 8 - Allure de l'usure VB et KT du CBN7020 au début et à la fin de l'usinage $V_c=180$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.08$ mm/tr