

1 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Mohieddine Benghersallah*, Lakhdar Boulanouar*, Arnaud devillez**, Gaël Leco^{**}, Daniel Dudzinski**

*Laboratoire de mécanique des matériaux et maintenance industrielle (LR3MI) ; Université Badji Mokhtar Annaba BP12 23000 E-mail :didinelr3mi@yahoo.fr

**Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux UMR CNRS 7554, ISGMP– Bâtiment C, Ile du Saulcy, 57045 METZ, Cedex 01, France

Résumé :

Le travail présenté est une étude expérimentale sur l'usinage en fraisage des couches de rechargement base cobalt (Stellite 6) monocouche et bicouche.

Il s'agit d'étudier l'usinabilité des couches de rechargement qui présentent une structure métallurgique fortement hétérogène. Cette hétérogénéité se traduit en usinage par un écrouissage superficiel élevé qui provoque l'usure prématurée des outils de coupe.

Cette dégradation résulte d'une adhésion entretenue du copeau conduisant à des usures en entailles et des écaillages très sévères des plaquettes de fraisage. Cinq nuances de plaquettes revêtues ont été testées pour différents paramètres du régime de coupe en UGV, une investigation détaillée du comportement à l'usure des plaquettes ainsi que son évolution par le système Wattpilote de surveillance du processus de coupe a été développée.

Mots clés

Rechargements base cobalt, usinabilité, Fraisage grande vitesse, Wattpilote.

Abstract

The forging work involves extreme impacts, forces, stresses and temperatures. Thus, mould dies must be extremely resistant. The aim of the project ANR PROMETFOR is to create a rapid prototyping process answering to forging conditions integrating a Stellite 6 hardfacing deposited PTA process. This study talks about the dry machining of the hardfacing, using a two tips machining tool and a high speed milling machine equipped by a power consumption recorder Wattpilote. The aim is to show the machinability of the hardfacing, measuring the power and the tip wear by optical microscope and white light interferometer, using different strategies and cutting conditions.

Keys words

Weld hardfacing base-cobalt, Machinability, High speed milling, Wattpilote

1 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

1. Introduction

Pour prolonger la durée de vie des outillages de forge, le rechargement de surface des matrices et des moules est couramment pratiqué. Des superalliages base cobalt ou base nickel déposés par soudage sont souvent utilisés pour leurs remarquables résistance à l'usure et à l'oxydation sous condition de haute température.

Le rechargement est aussi utilisé à titre préventif ou curatif et ce afin de prolonger la durée de vie d'outillage en service. On distingue différents types de rechargements et un grand nombre de variétés :

- Les rechargements superalliages à base de fer
- Les rechargements superalliages à base de nickel
- Les rechargements superalliages à base de cobalt

Les rechargements à base de fer ont un emploi limité parce qu'ils ne résistent pas aux températures supérieures à 550°C.

Les rechargements base nickel ou base cobalt sont devenus incontournables et particulièrement les stellites 6.

Le rechargement stellite 6

Le stellite 6 est une poudre de rechargement d'alliage à base de cobalt conçue pour produire des revêtements durs et denses. Les revêtements stellite 6 sont recommandés pour leur grande résistance à l'usure aux grains abrasifs et le contact avec les surfaces dures. Les techniques de rechargement ont aussi évoluées, du revêtement par soudage à l'air libre aux revêtements par arc guidé sous protection. Les techniques utilisées actuellement sont particulièrement le procédé TIG (Tungstène insert gaz), le procédé MIG (métal insert gaz) et le procédé PTA (plasma transfert arc). Nous développerons ce dernier procédé qui concerne directement notre étude.

Le rechargement stellite 6 par le procédé PTA

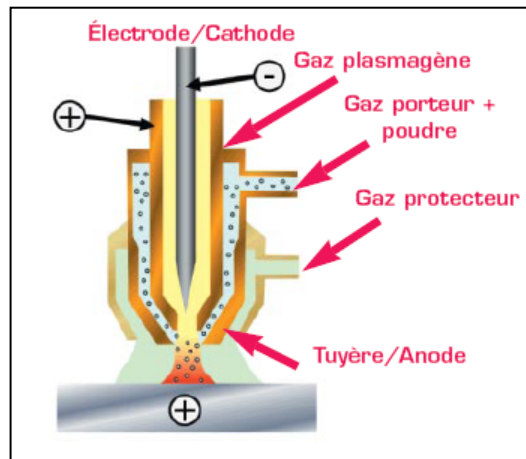


Figure1. Schéma de principe du procédé PTA

2 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Caractéristiques Générales

Dérivé de la technique de projection par plasma soufflé et des techniques de rechargement soudé (M.I.G., T.I.G.), le P.T.A permet d'obtenir des dépôts d'une excellente qualité métallurgique. Le matériau d'apport est injecté sous forme de poudre dans la colonne plasma tandis que l'arc est transféré sur la pièce afin d'obtenir une parfaite métallurgie du rechargement. Les vitesses de fusion et de solidification élevées permettent d'obtenir des structures extrêmement fines et résistantes.

Avantage de la technologie

Par rapport aux autres moyens de rechargement à l'arc électrique, ce procédé présente plusieurs avantages :

- Travail sous courant de 30 ampères pour une équivalence T.I.G. de 100 ampères,
- Meilleure gestion du bain de soudage, limitation de la zone du substrat affectée thermiquement et de la dilution du métal (- de 3% pour PTA contre 8 à 13% pour TIG),
- Vitesse de rechargement élevée,
- Grande fiabilité du procédé (contrôle des paramètres et automatisation),
- Adapté pour les pièces à faible capacité thermique.

Applications industrielles

- Automobile (sièges de soupapes)
- Plastiques d'extrusion, moules (vannes anti-retour, sommets de vis)
- Forage (outils)
- Nucléaire (pompes, sièges de vanne...)
- BTP, agricole (socs, dents)
- Travail à chaud (matrice de forge, nez, ogive)

L'usinage des couches de rechargement

La précision géométrique et l'état de surface des formes fonctionnelles sont soumises à des tolérances très strictes. L'usinage des couches de rechargement est donc inévitable. , c'est pourquoi il faut chercher les meilleures conditions de travail pour garantir la rentabilité de cette nouvelle technique.

Compte tenu du rôle prépondérant des opérations d'usinage, il est important de pouvoir bénéficier d'une bonne usinabilité. Les superalliages sont caractérisés par leur usinabilité difficile. La productivité de l'usinage traditionnel reste relativement faible par rapport aux autres procédés de fabrication.

Le développement ces dernières années des techniques de fabrication des matériaux de coupe a permis aux spécialistes de l'usinage de travailler avec une grande vitesse des matériaux qui étaient autrefois très difficile à façonner à l'outil coupant. En effet, il est possible maintenant et grâce aux carbures revêtus, les céramiques, les nitrures de bore cubique et les diamants polycristallins d'usiner des aciers fortement alliés traités ayant des duretés de l'ordre de (60 HRC). Le deuxième facteur qui a facilité ce développement et le progrès réalisé dans la fabrication de la machines – outil Akula et Karunakaran,(2006).

La dernière de ces évolutions est certainement l'introduction de l'usinage à grande vitesse (UGV). Cette technologie n'est pas récente comme l'on pourrait s'imaginer, bien que ses réelles applications industrielles remontent seulement à la fin des années 80 H. Schultz, (1997). L'UGV a acquis une véritable importance

3 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

industrielle seulement dans les années 90. L'usinage grande vitesse des couches de rechargements stellites n'est qu'à ses premiers pas.

El Mansouri et al (2005,2007) ont étudié l'usinabilité à grandes vitesses des couches de rechargements déposées par soudage pour des outils de forge. L'usinage à grande vitesse des rechargements Base-Nickel, est présenté comme une solution pour diminuer le coût de la fabrication des pièces. L'usinabilité à grande vitesse et à sec des pièces rechargées base-nickel est limitée par l'usure prématurée d'outil. L'usinage est accompagné par une action adhésion du copeau et l'écaillage de l'arête et par une action d'abrasion qui se manifeste par un labourage et un écrouissage de la couche usinée.

X.J. Ren et al. (2004) ont étudié l'usinabilité en tournage d'un rechargement base-chrome sur une couche de 6mm d'un acier doux. Le critère d'évaluation considéré est la température à l'interface pièce outil. Le matériau de coupe testé est le CBN. L'étude a montré qu'au-delà de 600°C la structure de la couche superficielle de la surface usinée présente hétérogène carbure-chrome. Cet état rend l'usinage difficile et limite les paramètres de coupe de l'outil.

Lors d'une des journées techniques organisées par le CETIM, Stéphane GUERIN a présenté une étude portant sur l'usinage des outillages rechargés. L'étude se compose d'une enquête sur les usinages réalisés par les forgerons français et d'essais d'usinage sur des rechargements base cobalt et base fer.

L'étude menée par l'équipe usinage grande vitesse du laboratoire de physique et mécanique des matériaux sous la direction du professeur D. Dudzinski et A. Devillez (2007) sur l'usinage du rechargement base cobalt, Stellite grade 21 est effectué sur des matrices d'ébavurage, sur une épaisseur moyenne de 6mm au moyen d'un procédé MIG. La matière de base est un acier Z38CDV5. Les conditions de coupe utilisées à la fois pour l'ébauche et la finition pour des outils Ø8 mm (4 et 2 dents) sont une vitesse de coupe $V_c=60\text{m/min}$ et une avance par dent $f_z=0,1$, une profondeur de passe $a_p=10\text{mm}$ et une avance axiale $a_e=0,3\text{mm}$.

Le rechargement base fer est opéré sur des matrices d'ébavurage, sur une épaisseur moyenne de 2 à 8mm au moyen d'un procédé MIG. La matière de base est un acier Z38CDV5

Les conditions de coupe utilisées à la fois pour l'ébauche avec un outil Ø12 mm (2 dents) sont une vitesse de coupe $V_c=94\text{m/min}$ et une avance par dent $f_z=0,2\text{mm/d}$, une profondeur de passe $a_p=2$ à 8mm et une avance axiale $a_e=0,5\text{mm}$.

Les conclusions de l'étude préconisent que pour une augmentation de la productivité et une réduction des coûts il faut:

- utiliser des attachements rigides,
- utiliser des outils avec une acuité d'arête importante, avec un affûtage soigné.
- usiner sur une hauteur de coupe importante pour une répartition de l'usure, une réduction des sections de copeaux (en épaisseur), une augmentation de la durée de vie des outils coupants ainsi que pour permettre de palier les irrégularités de l'épaisseur. Ainsi la stratégie adaptée aux rechargements est Un « Fort a_p / Faible a_e » afin d'augmenter le débit copeaux et la durée de vie des outils.

L'objectif de l'étude est :

4 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

- Détection de l'usure par les Wattpilotes.
- Mise en évidence des modes d'usure
- Bilan sur les durées de vie

2. Procédure expérimentale

Les essais d'usinage grande vitesse sont réalisés par le procédé de fraisage UGV des couches de rechargement en stellite 6 des blocs d'acier Z38CDV5 utilisés pour la fabrication de matrices et des moules.

Machine-outil

Centre d'usinage Rödgers RP600 à trois axes.

Puissance 17 Kw

Vitesse de rotation Maxi 36000 tr/min

Vitesse d'avance maxi 60000mm/min

HSK E50 30 outils

Diamètre maxi 20mm

Courses maxi X= 600mm, Y=540mm, Z=300mm

Commande numérique RMS6, programmation ISO



Figure2. Centre d'usinage Rödgers RP600 à trois axes.

Eprouvettes testées

Les éprouvettes testées sont des blocs en acier fortement allié Z38CDV5 revêtues par chargement monocouche et bicouche en stellite 6 par le procédé PTA. La dureté moyenne de la couche du rechargement est de 50HRc.

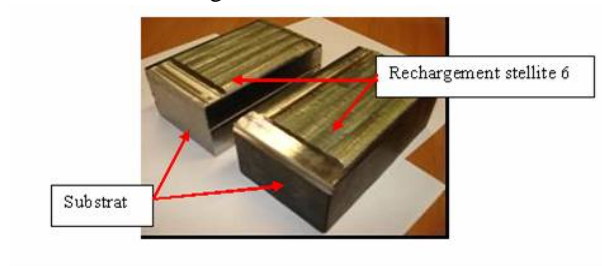


Figure3. Echantillons à tester

5 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Outil de coupe employé

L'outil de coupe est une fraise cylindrique à deux plaquettes en carbure. Cinq nuances avec différents revêtements sont testées.

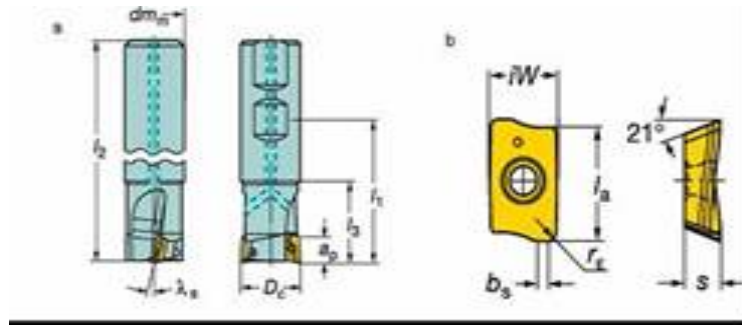


Figure 4. 8a) fraise coromill 390 - 8b) détails plaquette

Plaquettes de coupe testées

Plaquettes	Substrat	Revêtement et Procédé
3040	Bicarbure à grains fin Riche en cobalt	Multicouches TiN PVD
1030	Bicarbure à grains fin Haute tenacité	Multicouches TiN+TiCN+TiAlN PVD
4240	Bicarbure à grains fin Riche en cobalt	Multicouches TiN+ TiCN+Al ₂ O ₃ CVD
4030	Bicarbure à grains fin Riche en cobalt	Multicouches TiN+ TiCN PVD
H13.A	Bicarbure à grains moyens	TiAlN nanocristallin PVD

Tableau 1. Indications sur les plaquettes d'après les références Sandvik

6 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Surveillance de l'usinage

Wattpilote est un dispositif conçu pour la surveillance de l'usinage en temps réel



Figure5. Bloc électronique WattPilote

3. Résultats des essais et traitement

Au cours des essais, tous les Wattpilotes sont activés. Les puissances électriques consommées par les moteurs des axes x, y, z et de la broche ont donc été enregistrées puis traitées.

Evolution des puissances et usures (rechargement PTA monocouche)

Le premier essai d'usinage du rechargement monocouche permet de classer cinq plaquettes différentes afin de qualifier les meilleurs. Les conditions de coupe utilisées sont les suivantes :

- Vitesse de coupe $V_c = 190$ m/min,
- Avance à la dent $f_z = 0.067$ mm/dent
- $a_e = 0,3$ mm, $a_p = 3$ mm

Evolution des puissances

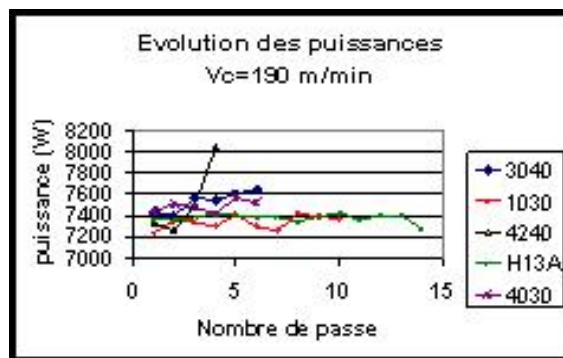


Figure6. Evolution des puissances usinage du rechargement monocouche ($V_c = 190$ /min)

7 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Evolution de l'usure des plaquettes testées

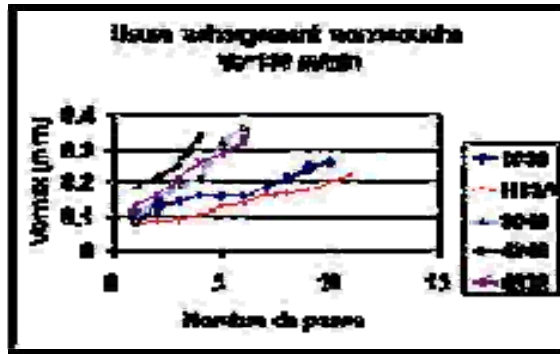


Figure7. Evolution de l'usure V_{bmax} pour les cinq nuances testées

L'usinage du rechargement stellite 6 monocouche avec les conditions de coupe citées ci-dessus a permis la qualification des nuances de plaquettes suivantes : la 1030 et la H13A à revêtement nanocristallin.

Pour les autres essais, nous avons étudié le comportement à l'usure de ces deux nuances.

Evolution des puissances et usures

Rechargement PTA bicouche

Les conditions de coupe utilisées sont les suivantes :

- Vitesse de coupe $V_c = 190$ m/min,
- Avance à la dent $f_z = 0.067$ mm/dent
- $a_e = 0,3$ mm, $a_p = 5$ mm

Evolution des puissances

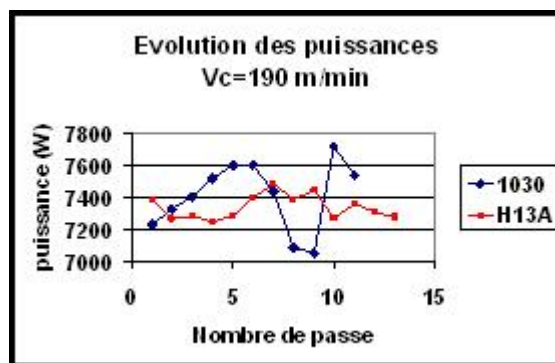


Figure8. Evolution des puissances usinage rechargement bicouche ($V_c = 190$ m/min)

8 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Evolution de l'usure des plaquettes 1030 et H13A testées ($V_c=190\text{m/min}$)

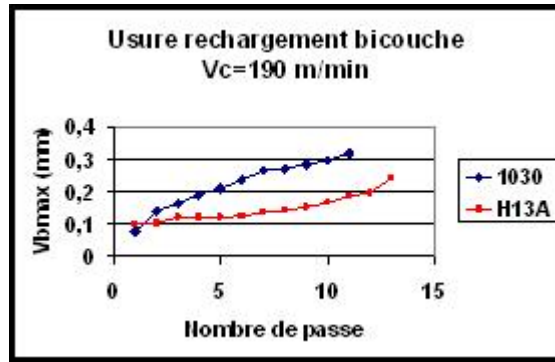


Figure9. Evolution de l'usure V_{bmax} pour les deux nuances testées ($V_c=190\text{m/min}$)

Usinage du rechargement bicouche ($V_c=230\text{m/min}$), $a_e=0,3\text{mm}$, $a_p=5\text{mm}$.
Evolution des puissances

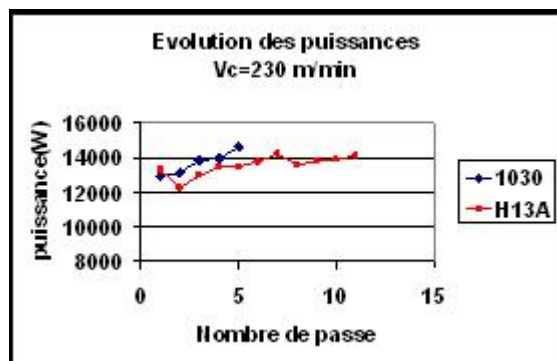


Figure10. Evolution des puissances usinage rechargement bicouche ($V_c=230\text{m/min}$)

9 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Evolution de l'usure des plaquettes 1030 et H13A testées ($V_c=230\text{m/min}$)

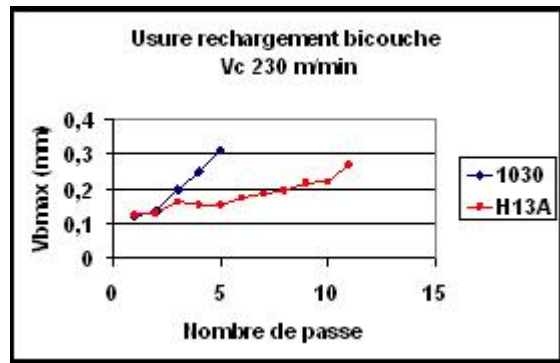


Figure11. Evolution de l'usure V_{bmax} pour les deux nuances testées ($V_c=230\text{m/min}$)

Une troisième série de tests d'usinabilité du rechargement bicouche est réalisée avec les conditions de coupe suivantes :

$V_c=120\text{m/min}$; $a_e=0,3\text{mm}$; $a_p=5\text{mm}$.

La 1030 a usiné pendant 20 passes et la H13A a usiné pendant 24 passes.

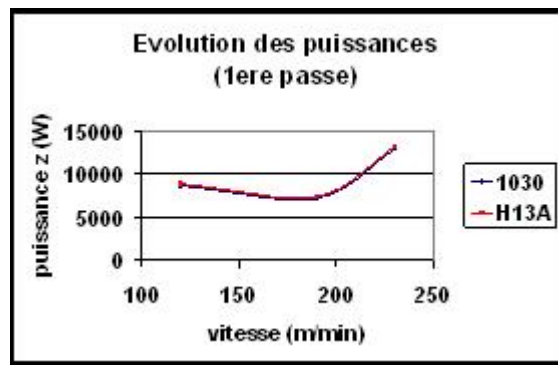


Figure12. Evolution de la puissance en fonction de la vitesse de coupe

10 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Morphologie de l'usure des plaquettes testées

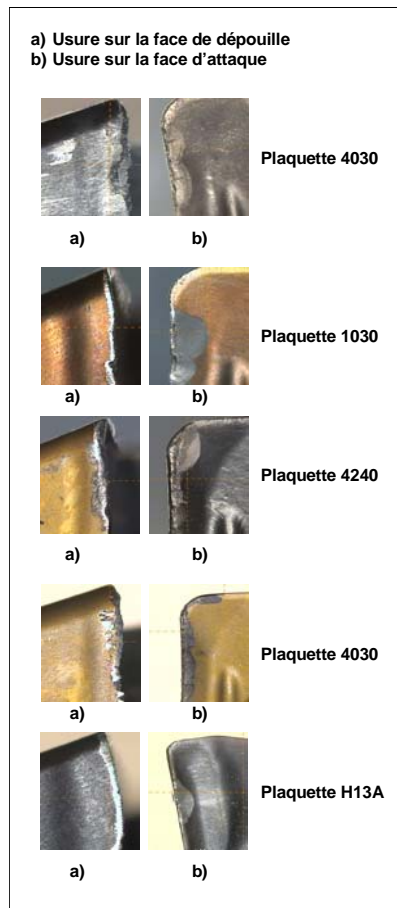


Figure13. Photographies optiques des plaquettes testées
a) surface de dépouille b) surface d'attaque

4. Analyse et discussion

L'analyse des résultats des essais d'usinage des différentes plaquettes de coupe sélectionnées, montre que dans la première série de tests avec les conditions d'usinage citées dans la procédure expérimentale, l'usinabilité des rechargements stellite 6 est particulièrement difficile. Elle s'accompagne par une usure prématurée des plaquettes de coupe. Une adhésion entretenue du copeau accélère le processus.

11 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

Les surfaces d'attaque et de dépouille subissent des contraintes considérables qui découlent de la pression et le frottement du copeau.

L'analyse des courbes de puissance par rapport au temps (quantifié en nombre de passes) de la figure 6, montre que parmi les cinq nuances de plaquettes testées, la 1030 et la H13A à revêtement nanocristallin consomment moins de puissance que les trois autres.

L'analyse des courbes d'usure par rapport au temps de la figure 7, montre que l'usure en dépouille pour les plaquettes 4240, 3040 et la 4030 évolue rapidement vers des valeurs dépassant l'usure admissible. Contrairement, celle des plaquettes 1030 et la H13A est plus lente.

L'examen de la morphologie de l'usure des plaquettes testées au microscope optique a montré que pour les plaquettes 4240, 3040 et la 4030, l'usure sur la surface en dépouille évolue progressivement avec un effet d'entaille suivi d'un écaillage prononcé sur la face d'attaque. L'arête tranchante perd son acquitté. Au fur et à mesure, le revêtement se détache et l'usure s'imprime dans le substrat.

L'analyse interférométrique des surfaces d'attaque et de dépouille des différentes plaquettes montre qu'après la disparition de la couche du revêtement (couche mince de 6 à 7 μm), il n'y a pas d'usure importante en profondeur sur la face en dépouille et l'absence de cratère en face d'attaque. Cela s'explique par la grande cohésion du substrat en carbure micrograins. L'usure en entaille est présente sur toutes les plaquettes testées. Pour la nuance 1030, l'usure en dépouille évolue très lentement, l'écaillage sur la face d'attaque est plus important. Pour la nuance H13A, l'usure en dépouille évolue très lentement et semble être freinée. L'arête de coupe conserve bien son acquitté mais un large écaillage s'est produit sur la face d'attaque ce qui a conduit à l'arrêt de l'essai.

La deuxième série de tests d'usinage du rechargement stellite 6 bicouche sur une profondeur $a_p=5\text{mm}$, avec les deux meilleures nuances sélectionnées, la 1030 et la H13A à revêtement nanocristallin a donné des résultats satisfaisant comparativement aux essais d'usinage sur le rechargement monocouche.

L'analyse des courbes de puissance en fonction du temps, figure 8 montre que la puissance au cours du test de la plaquette 1030 augmente puis diminue brusquement pour augmenter une seconde fois vers la fin de l'essai. Pour la plaquette H13A, la puissance reste plus ou moins stable, la valeur a tendance à diminuer en fin d'essai.

L'analyse des courbes d'usure en fonction du temps, figure 9 montre que l'usure en dépouille évolue lentement pour les deux nuances de plaquettes testées. Pour la plaquette H13A l'intervalle de l'usure normale est plus long. Par rapport à la plaquette 1030, la H13A résiste mieux à l'usure. Cette résistance est due à la protection que lui confère le revêtement TiAlN nanocristallin. Lorsque le revêtement disparaît sous l'effet du frottement et l'adhésion du copeau, le substrat à grains moyens présente une faiblesse remarquable comparativement au substrat micro grains de la plaquette 1030. L'écaillage qui se produit sur la face d'attaque de la plaquette 1030 est bien géré, il y a une résistance à la propagation de la zone écaillée, c'est l'usure en dépouille qui atteint sa valeur admissible et oblige l'arrêt de l'essai.

12 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

L'examen de la morphologie de l'usure des plaquettes 1030 et H13A par l'interféromètre à lumière blanche montre que sur la surface en dépouille de la plaquette 1030, il y a une usure importante accompagnée de la formation d'une entaille profonde. Un écaillage moins important qui s'est formé sur la face d'attaque avec une perte de l'acuité de l'arête tranchante.

L'image interférométrique de la plaquette H13A montre qu'il y a détachement du revêtement et une fissuration du substrat sur la face de coupe allant jusqu'à l'arête tranchante.

L'analyse des courbes de puissances en fonction du temps pour la deuxième série de tests d'usinage du revêtement PTA du stellite 6 bicouche avec la vitesse de coupe $V_c=230\text{m/min}$ de la figure 10 montre que pour les deux nuances testées, il y a augmentation de puissance au cours de l'usinage pour la plaquette H13A. Cela peut être expliqué par le phénomène du copeau adhérent qui provoque une modification de la géométrie du schéma de coupe. En effet lorsque le copeau adhère sur l'arête tranchante, l'angle de coupe varie ce qui se traduit par un changement dans le plan du cisaillement. La puissance peut à cet effet augmenter ou diminuer.

L'analyse des courbes d'usure en fonction du temps figure 11 montre que la plaquette 1030 s'use plus rapidement et perd ses performances par rapport à la plaquette H13A qui présente une résistance à l'usure assez grande malgré l'augmentation de la vitesse de coupe.

L'examen des plaquettes au microscope optique révèle que sur la surface d'attaque de la plaquette 1030 au niveau de l'arête tranchante un sévère écaillage accompagné d'un détachement du substrat sur la zone d'entaille de profondeur de passe. L'usure en dépouille est assez prononcée ce qui a mis fin à l'essai. Pour la plaquette H13A, l'examen a montré que l'usure sur la face en dépouille n'évolue pratiquement pas et l'arête conserve son tranchant. L'écaillage sur la face de coupe se produit comme pour les autres conditions, un début d'entaille commence à prendre naissance au niveau de la zone de profondeur de passe.

La troisième série de tests sur le revêtement PTA bicouches avec la vitesse de coupe $V_c=120\text{m/min}$ a donné des résultats satisfaisant pour les deux nuances de plaquettes.

L'usure de la plaquette 1030 est progressive, les trois stades de l'usure sont périodiquement proches. Pour la H13A, l'usure se manifeste par des paliers montrant une certaine stabilité, le premier à partir de la cinquantième seconde et le second vers la deux cent quarantième seconde. L'examen au microscope montre que les deux plaquettes ont subi un écaillage sévère sur la face de coupe à proximité de la surface extérieure du rechargement.

Différentes vitesses de coupe ont été testées au cours de l'étude, toutes dans les mêmes conditions (a_p , a_e et matériau). La figure 12 montre l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse de coupe. Pour les plaquettes 1030 et H13A sélectionnées, la vitesse la plus appropriée en termes de puissance est la V_c de 190 m/min. Le graphique montre aussi que quelque soit la vitesse de coupe, la plaquette H13A consomme légèrement plus de puissance que la plaquette 1030.

13 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

5. Conclusion et perspectives

L'étude expérimentale que nous avons menée nous permet de conclure que :

L'usinabilité des couches de rechargement PTA en stellite 6 est possible mais difficile. Les plaquettes de coupe de fraisage subissent différents types d'usure.

Au cours de l'usinage à grande vitesse des matériaux durs et à usinabilité difficile, il faut réduire la valeur du critère d'usure admissible de la surface en dépouille VB à la valeur $[VB]=0,2\text{mm}$. L'entaille par sa longueur et sa profondeur peut s'avérer un autre critère d'évaluation à considérer.

L'adaptation du système WattPilote au centre d'usinage pour le contrôle de l'usinage est satisfaisante. Il donne l'opportunité d'avoir un suivi de l'évolution du processus de coupe en temps réel, le contrôle simultané de l'usure va prévenir sur le temps des changements des outils.

Un comparatif de l'usure avec la puissance

Les courbes de puissance suivant les axes X, Y et Z sont en parfaite adéquation avec les courbes d'usure, l'augmentation de la puissance au cours du processus d'usinage peut être à cause de l'usure de l'outil.

Une qualification de l'outil (plaquette) de fraisage pour l'application industrielle.

La méthodologie adoptée dans les essais et les critères considérés pour quantifier les paramètres intégrés dans le processus donne une qualification d'outil sans incertitudes.

Pour résoudre le problème de détachement plus ou moins prématuré du revêtement sur la face d'attaque et à proximité de la surface extérieure du rechargement, il est souhaitable de considérer dans une autre étude le phénomène d'adhésion du copeau en s'orientant vers les propriétés du revêtement.

Une lubrification localisée sur la face de coupe à l'aide d'un jet d'air mélangé avec un liquide aux propriétés réfrigérantes et lubrifiantes peut améliorer les résultats.

References

[Aku. 1] Akula et Karunakaran, 2006. Computer-Integrated Manufacturing, Volume 22, Issue 2, April Pages 113-123.

[El mans. 2] M. EL Mansori, M. Nouari 2007. Dry machinability of nickel-based weld-hardfacing layers for hot tooling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 .1715–1727

[El mans. 3] M. El Mansoria, L. Fouilland-Paillé et F. Pierron 2005. Usinabilité à grande vitesse et à sec des couches du rechargement base-nickel par soudage d'outillage à chaud. Mécanique & Industries 6, 211–225 (2005)

[Ren. 4] X.J. Ren, Q.X. Yang , R.D. James , L. Wang. 2004 Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling. Journal of Materials Processing Technology 147. 38–44

[Schul. 5] H. Schultz, 1997. Fraisage grande vitesse des matériaux métalliques et non métalliques, Société Française d'Editions. Techniques SOFETEC, Boulogne

14 Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6

[Cetim. 6] CETIM, 1996. Les atouts de l'usinage à grande vitesse: Fraisage et perçage des métaux durs.

[Dudzin. 7] Dudzinski et A. Devillez (2007). L'usinage du rechargement base cobalt, Stellite grade 21 sur des matrices d'égavurage. Rapport équipe UGV (projet PROMETFOR). 2007

[Rabino. 8] G.S. Fox-Rabinovich , J.L. Endrino , B.D. Beake , A.I. Kovalev , S.C. Veldhuis , L. Ning , F. Fontaine A. Gray. 2006. Impact of annealing on microstructure, properties and cutting performance of an AlTiN coating. Surface & Coatings Technology 201. 3524–3529

[Elbesta. 9] M. A. Elbestawil , L. Chenz, C. E. Beczel, T. I. El Wardanyl. 1997 High-speed Milling of Dies and Molds in Their Hardened State. Annals of the CIRP Vol. 46/1/1997

[Sandvik. 10] Catalogue "Sandvik Coromant".2007 The new generation of milling grades. Six new ways to better productivity