

Capabilité des micro-fraises en carbure de tungstène à usiner un acier à moule d'injection plastique

GILBIN Alexandre ^a, FONTAINE Michaël ^b, MICHEL Gérard ^b, PICART Philippe ^c,
THIBAUD Sébastien ^c

Laboratoire FEMTO-ST, département de mécanique appliquée, Besançon

a. CNRS, b. ENSMM Besançon, c. Université de Franche-Comté

Résumé :

La présente étude constitue une étude préparatoire de l'usinage d'une empreinte de moule d'injection plastique par micro-fraisage. Basée sur des résultats expérimentaux, elle permet de mettre en évidence certains phénomènes liés au procédé. Il est alors possible de dégager trois grands axes d'influence : le matériau usiné, la géométrie et le matériau de l'outil. Les résultats présentés résultent de l'usinage d'un acier 45NiCrMo16 à l'état trempé avec des micro-fraises en carbure de tungstène revêtu de diamètre 0,5 mm. Ils seront principalement liés aux conditions de coupe et phénomènes d'usure. Néanmoins, des aspects dynamiques de la coupe ainsi que la géométrie de l'outil seront abordés.

Abstract :

The present study constitutes a study of machining of a plastic injection moulding moulds by micro-milling. Based on experimental results, it allows to enlight different phenomena connected to the process. It is then possible to extract three main axes of influence: material of the mould, geometry and material of the tool. The presented results deal with the milling of hardened tool steel 45NiCrMo16 with 0.5 mm diameter coated tungsten carbide micro-mills. They will be mainly connected to cutting conditions and wear mechanisms. Nevertheless, dynamic aspects of cutting process as well as the tool's geometry will be approached.

Mots clefs : micro-fraisage, outils de coupe, carbure de tungstène, acier dur

1 Introduction

L'augmentation de la demande en microcomposants mécaniques rend nécessaire la maîtrise des procédés de microfabrication. Parmi les procédés existants, le micro-fraisage apparaît comme le plus polyvalent. Issue de la réduction d'échelle de l'usinage conventionnel, il peut être vu comme l'utilisation d'outils de diamètre généralement compris entre 10 μm et 1 mm [1]. Il a l'avantage d'être applicable à une très large gamme de matériaux, aussi bien aux métaux qu'aux polymères. Il permet la mise en forme de pièce ayant une géométrie 3D complexe et des facteurs de forme relativement élevés [2]. Néanmoins, la miniaturisation du procédé entraîne l'amplification de plusieurs phénomènes jusque là négligés ou simplifiés lors de l'étude de l'usinage conventionnel.

Cet article présente l'usinage d'un acier dur, typiquement utilisé pour la réalisation d'un moule d'injection plastique, avec des micro-fraises en carbure de tungstène micro-grains revêtues par PVD. En s'intéressant aux principales caractéristiques attendues de ce type de pièce, c'est-à-dire à l'état de surface et à la présence de bavures d'usinage, cette étude va permettre de mettre en évidence certains phénomènes liés au procédé de micro-fraisage. A travers les tests de différentes fraises, dans différentes conditions de coupe, il sera possible de faire ressortir un comportement dynamique propre aux micro-fraises. L'étude de l'usure des outils et de la qualité de la surface usinée va permettre de faire apparaître un lien entre la géométrie, l'usure des micro-fraises et la qualité de la surface usinée.

2 Matériel expérimental

2.1 Matériaux et outils

Le matériau retenu pour l'usinage est un 45NiCrMo16 à l'état trempé (54 HRC). C'est un acier à moule d'injection plastique typique avec une microstructure fine et homogène. Pour ce matériau, l'effet des grains de matières vis-à-vis du procédé de micro-fraisage décrite par Simoneau et al. [3] peut-être considéré comme négligeable. Le principale effet d'échelle [4] sera donc dû à l'acuité d'arrête de coupe de l'outil face à l'épaisseur du copeau avant déformation.

Les outils retenus sont des micro-fraises diamètre de 0,5 mm, droites, à deux dents, en carbure de tungstène micro-grain. Ce choix place l'étude dans le milieu de la plage de micro-usinage définie en introduction. La figure 1 montre la géométrie globale des quatre types de fraises utilisées pour l'étude.

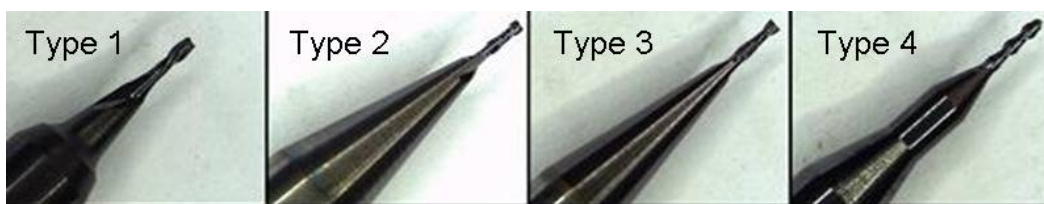


fig. 1. Géométrie globale des 4 types de fraises utilisées

Le tableau 1 récapitule les principales caractéristiques de ces quatre fraises. Les types 1, 3 et 4 sont proches des fraises de macro-usinage au niveau de leur géométrie locale (angle de coupe, dépouille, goujure, hélice). La fraise 2 procède une préparation de l'arrête de coupe visant à rendre plus robuste la zone de travail.

Fraise	revêtement	angle d'hélice (degrés)	Angle de coupe recherché (degrés)	rayon de bec (μm)
Type 1	TiAlN	30	15	2,5
Type 2	CrTiAlN	35	Préparation d'arête	0,9
Type 3	TiAlN	30	12	0,9
Type 4	TiAlN	45	10	2,5

TAB. 1. Principales caractéristiques des fraises utilisées

2.2 Moyens expérimentaux

Les opérations d'usinage ont été réalisées avec un centre de micro-usinage *Kern HSPC*. La broche utilisée dans cette étude autorise des vitesses de rotation de 0 à 35000 tr/min. Les outils sont montés en pince de précision dans un porte-outil HSK 25. Les mesures d'efforts de coupe ont été faite de façon directe avec une platine dynamométrique *Kistler 9272*. Après usinage, la qualité de la surface usinée (bavures et états de surfaces) a été observée à l'aide d'un topo microscope *Alicona Infinite focus*. L'usure des outils a été appréhendée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) équipé d'une sonde à rayons X.

3 Etude expérimentale

3.1 Influence de la vitesse d'avance

L'objectif ici est d'appréhender l'influence de l'avance d'usinage sur la qualité de la surface usinée. Pour cela, des essais de rainurage ont été réalisés dans les conditions suivantes :

- Essai en rainurage sur une longueur de 30 mm
- Vitesse de coupe constante de 40 m/min
- Profondeur de passe constante $a_p = 0,05$ mm
- Augmentation de l'avance de 1 à 40 $\mu\text{m}/\text{dent.tr}$ par pas de 1 $\mu\text{m}/\text{dent.tr}$
- Une seule fraise par essai (40 rainures)

Ces essais ont également permis d'obtenir l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance d'usinage.

La figure 2 montre l'évolution des bavures produites par l'usinage en fonction de l'avance à la dent utilisée pendant l'opération. Il apparaît d'une part que les bavures sont plus importantes au niveau de la sortie (en avalant) que de l'entrée (opposition) de l'outil dans la matière. D'autre part, l'augmentation de l'avance réduit nettement le volume et la hauteur des bavures. Ces essais font également ressortir qu'une meilleure acuité d'arrêt, c'est-à-dire un rayon de bec plus faible, permet de diminuer les bavures d'usinage [5] et rend la réduction de celle-ci plus rapide avec l'augmentation de la vitesse d'avance. De plus, le revêtement CrTiAlN aide à réduire la formation de bavure par rapport au TiAlN.

La figure 3 montre l'influence de l'avance d'usinage sur l'état de surface en fond de rainure ainsi que sur les efforts de coupe. Bien que les fraises 1, 2 et 3 semblent avoir un comportement sensiblement identique, la fraise de type 4 se détache des autres par une moins bonne qualité de surface usinée ainsi que par une augmentation importante des efforts sur l'outil lors des fortes avances. Pour le type 1, la détérioration de l'état de surface qui s'opère vers 20 $\mu\text{m}/\text{dent.tr}$, est lié à usure plus importante que pour les deux autres fraises.

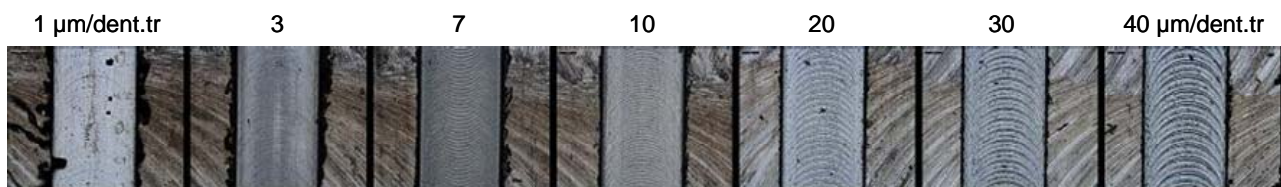


fig. 2. Evolution des bavures d'usinage en fonction de la vitesse d'avance

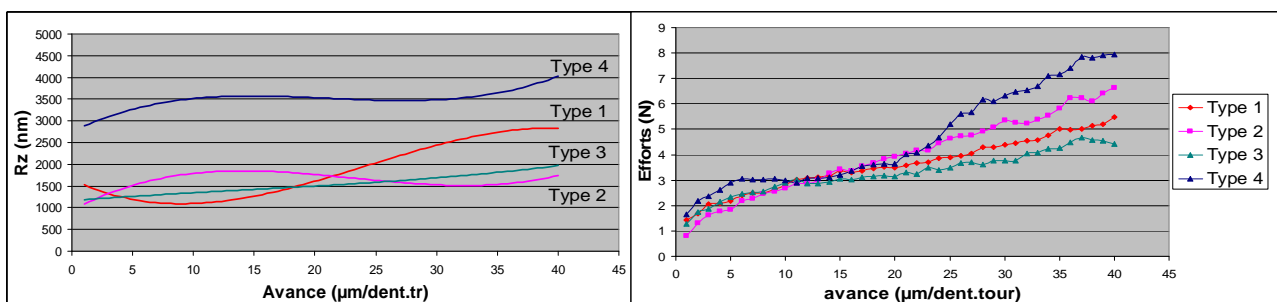


fig. 3. Influence de l'avance d'usinage sur les états de surfaces (courbes de tendance à gauche) et sur les efforts de coupes (à droite)

3.2 Influence de la vitesse de coupe

L'objectif ici est d'appréhender l'influence de la vitesse de coupe sur la qualité de la surface usinée. Pour cela, des essais de rainurage ont été réalisés dans les conditions suivantes :

- Essai en rainurage sur une longueur de 30 mm
- Vitesse d'avance constante $f_z = 13$ $\mu\text{m}/\text{dent.tr}$
- Profondeur de passe constante $a_p = 0,05$ mm
- Augmentation de la vitesse de coupe de 18 à 54 m/min par pas de 4 m/min

La figure 4 montre l'influence de la vitesse de coupe sur l'état de surface en fond de rainure ainsi que sur les efforts de coupe. Il apparaît un regroupement des fraises 1, 2 et 3. Dans la plage explorée, la variation de la vitesse de coupe n'a pas d'influence notable pour ces trois outils. La fraise 4 se distingue d'une part par

un moins bon état de surface générée. D'autre part, l'évolution des efforts de coupe laisse supposer un problème de stabilité de la coupe pendant l'usinage. Des observations au microscope optique viennent confirmer cette hypothèse. Ce phénomène est propre à l'utilisation d'un outil peu rigide. L'augmentation de la vitesse de coupe, et par conséquent de la vitesse de rotation, va faire apparaître une stabilisation dynamique de l'outil qui induit une stabilisation de la coupe.

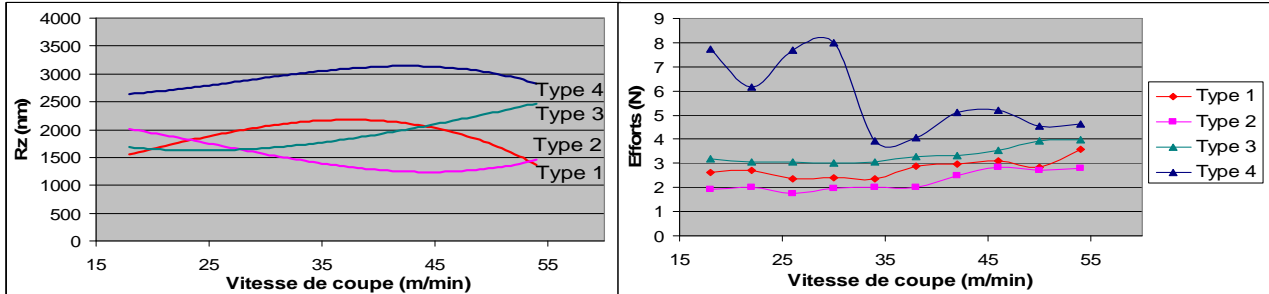


fig. 4. Influence de la vitesse de coupe sur les états de surfaces (courbes de tendance à gauche) et sur les efforts de coupes (à droite)

4 Phénomènes observés

L'étude expérimentale précédente a permis de faire ressortir plusieurs phénomènes liés au procédé de micro-fraisage. D'une part, comme vu précédemment, les hautes vitesses de rotations permettent une stabilisation dynamique de l'outil. D'autre part, il est possible de dégager deux types de phénomènes dynamiques liés au procédé :

- Des phénomènes basses fréquences à l'échelle de la passe,
- Des phénomènes hautes fréquences à l'échelle du passage d'une dent de l'outil.

4.1 Phénomènes basses fréquences

La figure 5 montre une courbe typique d'efforts de coupe mesurés pendant un essai de rainurage en micro-fraisage. Elle fait apparaître d'une part un amortissement qui peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$E = A(1 - \exp(-t/\tau))$$

Dans cette formule, τ est une fonction de l'avance à la dent. D'autre part, il en ressort une modulation de l'amplitude des efforts. La fréquence de cette modulation est proportionnelle à la vitesse de coupe et à l'avance d'usinage.

Ces deux phénomènes basses fréquences peuvent également être observés pendant des essais de macro usinage mais leurs effets sont généralement négligés. L'effet d'échelle lié au micro-fraisage oblige à les prendre en compte. En effet, le facteur d'amortissement provoque une augmentation de 50 à 100% des efforts de coupe initiaux par rapport à ceux mesurés en régime établi. Le phénomène de modulation entraîne quant à lui une variation de l'ordre de 25% des efforts.

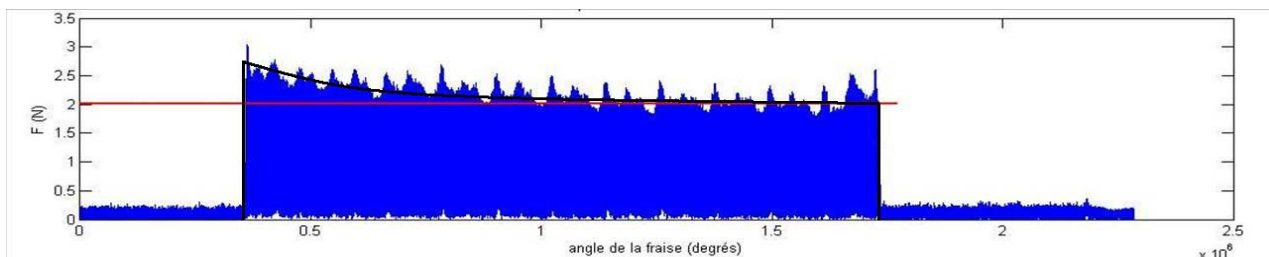


fig. 5. Efforts de coupe mesurés pendant un essai de rainurage ($V_c = 40$ m/min, $a_p = 0.05$ mm, $f_z = 4$ μ m/dent.tr)

4.2 Phénomènes hautes fréquences

Comme en macro-usinage, le faux rond de l'outil provoque un chargement plus important sur une dent de l'outil que sur l'autre. Ce défaut géométrique est principalement dû à l'erreur de mise en position de la fraise dans le porte-outil. En plus de cela, le procédé de micro-fraisage implique l'utilisation d'outils peu rigides, et donc très sensibles aux efforts qu'ils subissent. La figure 6 montre le fléchissement d'une micro-fraise pendant un fraisage d'épaulement (image obtenue à l'aide d'une caméra rapide). Comme le montre la figure 7, ce mouvement de l'outil se retrouve sur l'état de surface en fond de rainure. Des traces de glissement de la fraise sur la pièce usinée sont observables au niveau de l'entrée et de la sortie de matière. Le refus de coupe, inhérent à l'épaisseur trop fine de copeau en entrée-sortie, s'accompagne donc d'une modification de la cinématique de l'outil en translation et rotation. Dans les conditions d'usinage de la figure 6, la flèche mesurée en bout d'outil est d'environ 50 μm dans le sens de l'avance alors qu'elle n'est que de quelques microns dans le sens transverse.

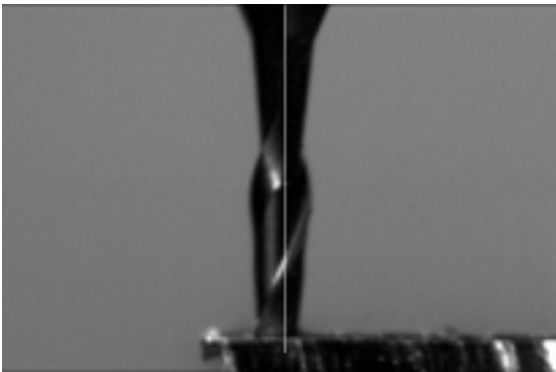


fig. 6. Fléxion de la fraise dans le sens de l'avance d'usinage ($V_c = 40 \text{ m/min}$, $a_p = 0,05 \text{ mm}$, $a_e = 0,1 \text{ mm}$)

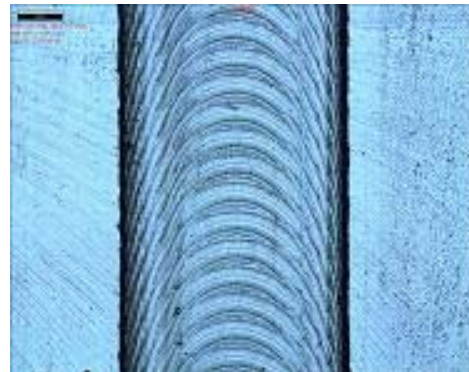


fig. 7. Stries d'usinages en fond de rainure

5 Usure d'outil

La figure 8 présente la durée de vie moyenne des micro-fraises étudiée en fonction de la vitesse d'avance. Les conditions d'usinage utilisées pour ces essais sont issues de l'étude expérimentale précédente, à savoir :

- Essai en rainurage sur une longueur de 30 mm
- Vitesse de coupe de 40 m/min (55 m/min pour le type 4)
- Profondeur de passe constante $a_p = 0,05 \text{ mm}$
- 3 vitesses d'avances : 4, 8 et 12 $\mu\text{m/dent.tr}$

Alors que la fraise de type 3 a un comportement prévisible, c'est-à-dire que sa durée de vie diminue de façon exponentielle avec l'augmentation de l'avance d'usinage, le type 1 se révèle plus exclusif à une plage d'utilisation. En effet, une bonne tenue à l'usure n'est obtenue qu'avec des conditions d'usinage particulières. La préparation d'arrête effectuée sur la fraise 2 lui procure une plage d'utilisation plus étendue que les trois autres types pour cette application.

La figure 9 montre l'usure typique en face et en dépouille d'une micro-fraise. Les essais ont fait ressortir qu'un angle de coupe recherché important diminue la résistance à l'usure de l'outil (l'angle de coupe réel étant plus faible et variable). Par ailleurs, la préparation d'arrête effectuée sur la fraise 2 permet de limiter le phénomène d'usure en face. D'un point de vue revêtement, le CrTiAlN aide à réduire l'usure en dépouille par rapport au TiAlN. Cela rejoint les conclusions faites par Aramcharoen et al. [6]. La comparaison des quatre outils a fait ressortir un problème de cohésion du carbure pour l'un d'entre eux. A la vue des résultats de l'ensemble des essais réalisés, la fraise de type 4 n'est pas appropriée à l'usinage d'un acier dur fortement allié.

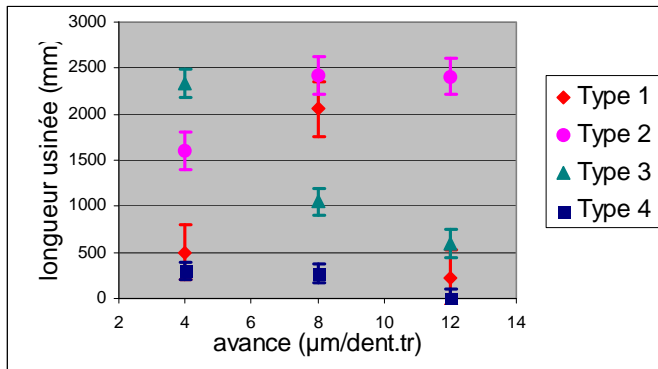


fig. 8. Durée de vie moyenne des micro-fraises en fonction de l'avance d'usinage

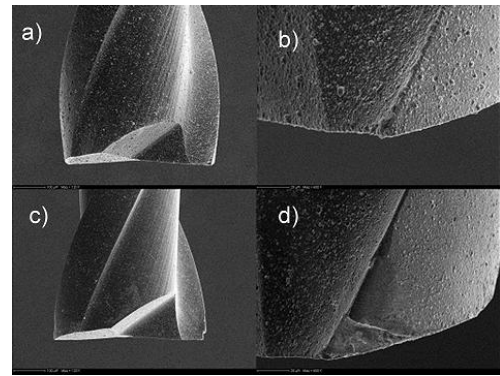


fig. 9. Face (a) et dépouille (b) d'une fraise neuve. Usure en face (c) et en dépouille (d) d'une fraise après usinage

6 Conclusion

Le présent article présente une étude de l'influence des conditions de coupe lors de l'usinage d'un acier fortement allié à l'état trempé en micro-fraisage. Les conclusions sont les suivantes :

- Le manque de rigidité des micro-outils entraîne l'apparition de phénomènes dynamiques avec notamment une stabilisation dynamique et un fléchissement non négligeable de la fraise.
- L'amélioration de la qualité de la surface usinée, et notamment la réduction des bavures, est conditionnée d'une part par l'acuité d'arête et le revêtement de l'outil, et d'autre part par l'augmentation de la vitesse d'avance. La diminution des bavures d'usinage passe donc par l'utilisation d'un outil capable de résister aux efforts supplémentaires induits.
- La géométrie locale des micro-fraises, tel que l'angle de coupe recherché, influe principalement sur la résistance à l'usure et non sur la qualité de la surface générée.

Ces travaux ont été menés dans le contexte du groupe de travail Manufacturing 21 regroupant 16 laboratoires français. Les thèmes abordés sont la modélisation et l'optimisation des procédés d'usinage et l'innovation dans le domaine de la fabrication mécanique.

References

- [1] T. Masuzawa, H.K. Tonshoff, Three-dimensional micromachining by machine tools, *Annals of the CIRP* 46 (2) (1997) 621-628.
- [2] C.R. Freidrich, P.J. Coane, Micro milling development and applications for micro fabrication, *Journal of Microelectronic Engineering* (35) (1997) 367-372.
- [3] A. Simoneau, E. Ng, M.A. Elbestawi, Chip formation during micro scale cutting of a medium carbon steel, *International Journal of Machining Tools and Manufacture* 46 (2006) 467-481.
- [4] L. Guyout, G. Fromentin, P. Picart, Effets d'échelle en Micro Fraisage d'un acier inoxydable 316L, 19^e Congrès Français de Mécanique (2009).
- [5] F.Z. Fang, Y.C. Liu, On minimum exit-burr in micro cutting, *Journal of Micromechanics and Micro engineering* 14 (2004) 984-988.
- [6] A. Aramcharoen, P.T. Mativvenga, S. Yang, K.E. Cooke, D.G. Teer, Evaluation and selection of hard coating for micro milling of hardened tool steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48 (2008) 1578-1584.