

Etude expérimentale et numérique de l'usinage d'un acier à haute résistance avec une plaquette de coupe revêtue

F. KONÉ, C. CZARNOTA, B. HADDAG, M. NOUARI

Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, LEMTA CNRS-UMR 7563, Ecole des Mines de Nancy (ENSMN), Ecoles des Mines d'Albi-Carmaux (EMAC), GIP-InSIC, 27 rue d'Hellieule, 88100 SAINT-DIE-DES-VOSGES (France)

Résumé :

Lors de l'usinage, les plaquettes de coupe sont soumises à d'importantes sollicitations thermomécaniques, pouvant conduire à une réduction considérable de leur durée de vie. Pour remédier à cela, l'utilisation de plaquettes de coupe revêtues en fonction des conditions de coupe et du procédé, mais également du matériau usiné, peut s'avérer bénéfique. Dans cette étude, une approche couplant simulations numériques et caractérisation expérimentale est mise en œuvre afin d'étudier l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304L avec une plaquette de coupe revêtue.

Abstract :

During machining, cutting tools are subjected to extreme thermomechanical loadings, leading to a considerable reduction of their lifetime. In order to prevent cutting tools from a rapid wear, coatings are often used and their nature is chosen in agreement with the cutting conditions and the process, but also the machined material. In this study, an approach coupling numerical simulations and experiments is performed in order to study the machining of an AISI 304L stainless steel with a coated cutting tool.

Mots clefs : usinage, acier inoxydable, plaquette, revêtement, rugosité, efforts de coupe

1 Introduction

En usinage, les études de comportement des plaquettes de coupe ont pour objectif de contribuer à l'optimisation de leur usage, car leur changement représente un coût non négligeable. L'utilisation de lubrifiants permet une réduction de l'usure des plaquettes de coupe, mais induit des effets néfastes sur l'environnement et la santé des opérateurs [1]. Dans une démarche prenant en compte ces aspects écologiques et sanitaires, tout en augmentant la durée de vie des outils, l'usinage à sec à l'aide de plaquettes de coupe revêtues permet de répondre à des objectifs d'optimisation du procédé de mise en forme.

Lors d'une opération d'usinage, les outils de coupe sont soumis à des sollicitations thermomécaniques extrêmes. Pour améliorer leur comportement et ainsi augmenter leur durée de vie, celles-ci sont souvent revêtues d'une ou de plusieurs couches de revêtements, chaque couche jouant un rôle particulier. Kone et al. [2] ont illustré, au travers de simulations numériques, le rôle de barrière thermique d'une couche d' Al_2O_3 déposée sur un outil en carbure de tungstène lors de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 316L. D'autres couches peuvent contribuer à la réduction du frottement outil/copeau [3]. Parmi les différents types de revêtements se distinguent ceux à base de Titane tels que $Ti(C,N)$ et $(Ti,Al)N$ qui jouent un rôle de réducteur de frottement outil/copeau, et les revêtements en céramique comme Al_2O_3 qui joue un rôle de barrière thermique [4, 5]. L'utilisation de plaquettes de coupe revêtues s'avère capitale lors de l'usinage particulièrement à sec d'alliages métalliques tels que les aciers inoxydables, en raison de leur faible conductivité thermique (environ $20 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). En effet, la chaleur générée à l'interface outil/copeau sera transportée avec plus de difficultés dans le copeau, accélérant ainsi le processus d'usure des plaquettes.

Dans cette étude, deux approches, expérimentale et numérique, sont considérées afin d'étudier l'usinage en tournage (chariotage) d'un acier à haute résistance avec une plaquette de coupe revêtue. Le matériau usiné est l'acier inoxydable AISI 304L et l'outil de coupe est une plaquette en carbure revêtue d'un dépôt multicouche $TiN-TiCN-Al_2O_3-TiN$. Les résultats discutés dans cet article portent sur les efforts de coupe et la rugosité de surface.

2 Essais de tournage

2.1 Moyens et protocole des essais de tournage

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un tour à commande numérique. Les pièces usinées sont de forme cylindrique de diamètre 100 mm et de longueur 120 mm. La géométrie des plaquettes de coupe est désignée par la référence ISO : TCMT16T308. Un dispositif d'acquisition d'efforts de coupe, d'avance et de pénétration a été utilisé (incluant une table KISTLER). L'angle d'attaque de l'outil κ_r est de 90° . La figure 1(a) présente le dispositif expérimental et la figure 1(b) la géométrie des plaquettes de coupe utilisées.

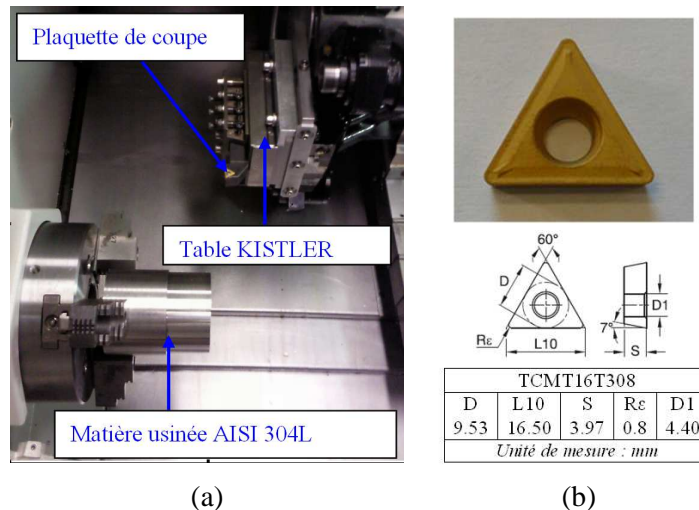


FIG. 1 – Dispositif expérimental (a), géométrie de la plaquette de coupe (b).

Plusieurs conditions de coupe ont été considérées afin de déterminer dans un premier temps la vitesse de coupe minimale ($V_{c_{min}}$) et l'avance minimale (f_{min}) permettant d'identifier une plage de coupe adaptée à l'usinage du 304L avec l'outil en carbure revêtu TiN-TiCN- Al_2O_3 -TiN. (tableau 1).

Vitesse de coupe V_c (m/min)								
20	50	100	150	200	250	300	400	500
Avance f (mm/tr)								
0.05		0.2		0.25		0.3		0.35
Profondeur de passe ap (mm)								
1								

TAB. 1 – Conditions de coupe considérées pour les essais expérimentaux.

Les essais portant sur la recherche de $V_{c_{min}}$ sont réalisés avec des valeurs d'avance $f = 0.2$ mm/tr et de profondeur de passe $ap = 1$ mm qui sont maintenues fixes. Quant à ceux concernant la recherche de f_{min} , ils sont réalisés avec $V_{c_{min}}$ et $ap = 1$ mm maintenues fixes. Dans le but de s'assurer d'une bonne répétitivité des résultats expérimentaux, trois essais ont été réalisés pour chaque condition d'usinage. De plus, une arête de coupe neuve a été utilisée pour chaque essai afin d'être dans des conditions d'usure similaires.

2.2 Résultats expérimentaux

2.2.1 Détermination des efforts spécifiques et de la rugosité

La figure 2(a) montre un exemple d'acquisition d'effort de coupe pour une vitesse $V_c = 100$ m/min, une avance par tour $f = 0.2$ mm/tr et une profondeur de passe $ap = 1$ mm. Sur l'exemple montré en figure 2(a), l'amplitude de l'effort moyen de coupe est de l'ordre de 426 N.

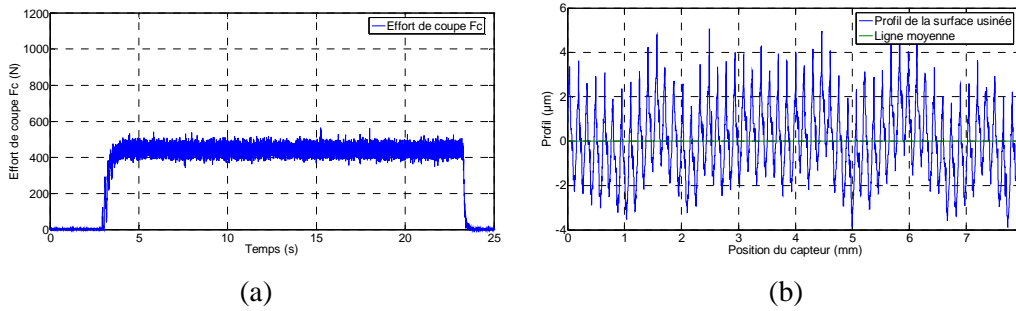


FIG. 2 – Exemple d’acquisition d’effort de coupe F_c (a) et de profil de surface usinée (b) ($V_c = 100$ m/min ; $f = 0.2$ mm/tr, $ap = 1$ mm).

Pour chaque condition d’usinage, les efforts spécifiques de coupe K_c , d’avance K_f , et de pénétration K_p ont été déterminés à l’aide des relations :

$$K_c = \frac{F_{c_{moyen}}}{f * ap} ; K_f = \frac{F_{f_{moyen}}}{f * ap} ; K_p = \frac{F_{p_{moyen}}}{f * ap} \tag{1}$$

où $F_{c_{moyen}}$, $F_{f_{moyen}}$ et $F_{p_{moyen}}$ désignent respectivement les efforts moyens de coupe, d’avance et de pénétration.

Dans le cadre de cette étude expérimentale, l’état de surface usinée a également été analysé. Pour chaque condition de coupe, la rugosité arithmétique a été calculée en utilisant la relation (2).

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \tag{2}$$

où l représente la longueur d’évaluation prise égale à 8 mm, et $y(x)$ la distance du profil à la ligne moyenne, x désignant la position du capteur, voir figure 2(b).

Les résultats expérimentaux se focalisent sur les efforts spécifiques de coupe K_c , d’avance K_f , de pénétration K_p et sur l’état de surface usinée.

2.2.2 Recherche de la vitesse de coupe minimale $V_{c_{min}}$

La vitesse de coupe minimale $V_{c_{min}}$ est identifiée à partir de l’évolution de K_c en fonction de V_c , voir figure 3. Une vitesse théorique minimale d’environ 85 m/min est obtenue, correspondant à un changement de pente dans la courbes $K_c(V_c)$, à laquelle 20% est ajoutée afin de laisser une marge de sécurité nécessaire pour ne pas se retrouver dans des conditions de coupe défavorables lors d’un usinage à faible vitesse [6]. La vitesse de coupe minimale retenue est donc $V_{c_{min}} = 100$ m/min.

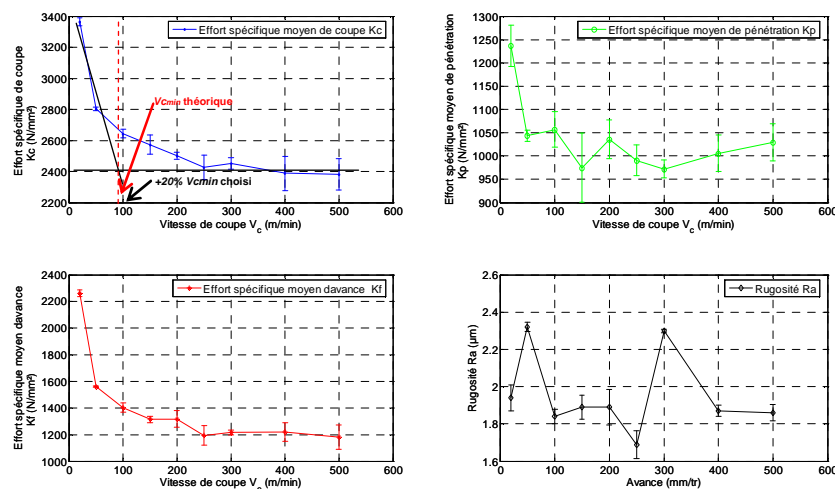


FIG. 3 – Efforts spécifiques de coupe K_c , d’avance K_f , et de pénétration K_p et rugosité Ra en fonction de la vitesse de coupe V_c ($f = 0.2$ mm/tr ; $ap = 1$ mm).

Les efforts spécifiques de coupe K_c , d’avance K_f et de pénétration K_p se stabilisent pour des vitesses de coupe supérieures à 200 m/min (K_c , K_p et K_f tendent respectivement vers 2400 MPa, 1000 MPa et 1200

MPa). On remarque sur la figure 3 une chute des efforts lorsque la vitesse de coupe augmente. Ce phénomène a été observé par d'autres auteurs [7 - 9], et s'explique par le fait que l'augmentation de la vitesse de coupe va entraîner une élévation de la température de la matière usinée. Cet adoucissement thermique va provoquer une chute des contraintes, induisant une baisse des efforts. Concernant la rugosité, on remarque une stabilisation de Ra pour les vitesses de coupe comprises entre 100 m/min et 200 m/min, 100 m/min étant la vitesse de coupe minimale choisie.

2.2.3 Recherche de l'avance minimale f_{min}

La détermination de f_{min} est faite selon la même procédure que celle adoptée pour l'identification de $V_{c_{min}}$, cf. figure 4 et conduit à $f_{min} = 0.15$ mm/tr.

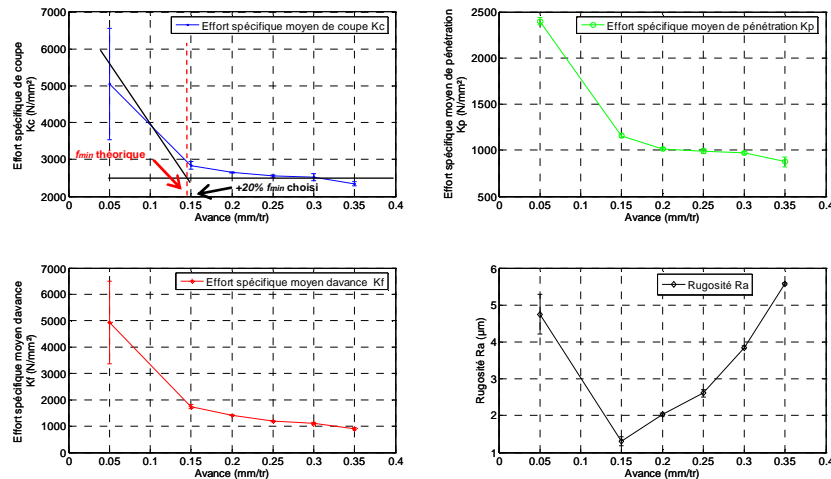


FIG. 4 – Efforts spécifiques de coupe K_c , d'avance K_f , et de pénétration K_p et rugosité Ra en fonction de l'avance f ($V_c = 100$ m/min ; $a_p = 1$ mm).

Les efforts spécifiques de coupe K_c , d'avance K_f et de pénétration K_p se trouvent stabilisés pour des avances supérieures à 0.15 mm/tr (K_c tend vers 2500 MPa, K_p ainsi que K_f tendent vers 1000 MPa). Lorsque l'avance f augmente, la quantité de chaleur issue de la déformation plastique augmente, favorisant l'adoucissement thermique et induisant une chute des contraintes et donc une baisse des efforts. La figure 4 met en évidence la dégradation de la qualité de surface usinée lorsque l'avance par tour augmente de $f = 0.15$ mm/tr, où $Ra = 1.2$ μ m, à $f = 0.35$ mm/tr où $Ra > 5$ μ m. Cette tendance, habituellement constaté n'est plus observée lorsque l'avance par tour est très faible ($Ra \approx 5$ μ m lorsque $f = 0.05$ mm/tr). Ceci peut s'expliquer par la géométrie de la plaquette adoptée et la préparation d'arête qui présente un rayon de l'ordre de 0,1 mm. La matière usinée est alors écrasée sous le passage de l'outil et les conditions de mise en forme conduisent à une dégradation de la qualité de surface.

3 Simulation numérique du tournage

Les simulations numériques du procédé de tournage en chariotage sont réalisées à l'aide du logiciel de calcul éléments finis DEFORM 2D en adoptant une approche de coupe orthogonale (déformations planes).

3.1 Mise en données

Les conditions de coupe considérées dans ce travail sont : $V_c = 100$ m/min et $f = 0.2$ mm/tr. La loi de comportement du matériau usiné tient compte des sensibilités à la vitesse de déformation et à l'écroutissage, ainsi que de l'adoucissement thermique. Le comportement de l'outil de coupe est thermo-rigide. Les données des matériaux sont fournies par la bibliothèque de DEFORM.

Pour obtenir le profil de l'outil de coupe en 2D, une section de l'outil numérisé en 3D (à l'aide d'un système d'acquisition par projections de franges structurées Breucmann) a été extraite. L'épaisseur du copeau non déformé h correspondant au profil 2D choisi est donnée par l'avance par tour f . Un remaillage automatique est initié dès lors que la distance de pénétration des nœuds du maillage l'outil dans celui de la pièce est de l'ordre de 20 μ m. Les épaisseurs des couches de revêtement sont choisies en accord avec les travaux de Grzesik, [10]. L'outil revêtu multicouche est composé d'une couche TiN de 1 μ m, d'une couche TiCN de 5

μm , d'une couche Al_2O_3 de $3\ \mu\text{m}$ et d'une couche TiN de $1\ \mu\text{m}$. La configuration adoptée pour la simulation numérique est décrite en figure 5 où l'outil de coupe est considéré fixe tandis qu'une vitesse V_c (vitesse de coupe) est appliquée à la pièce usinée.

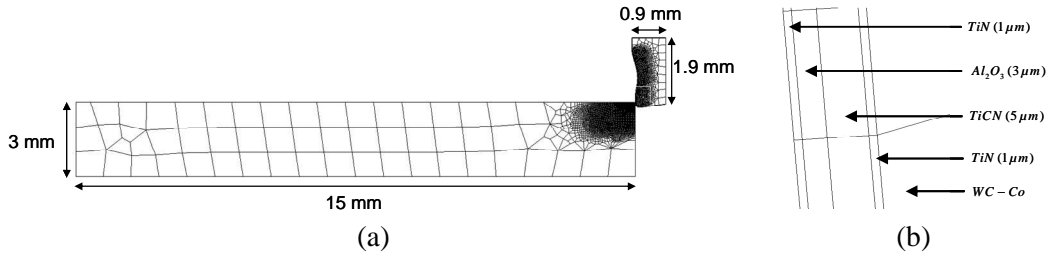


FIG. 5 – Géométries et maillages de la pièce et de l'outil (a), configuration des revêtements (b).

Le modèle de frottement choisi est celui de Coulomb avec un coefficient de frottement déduit des résultats expérimentaux à l'aide de la relation suivante :

$$\mu = \frac{\sqrt{F_{f_{\text{moyen}}}^2 + F_{p_{\text{moyen}}}^2}}{F_{c_{\text{moyen}}}} \quad (3)$$

Pour la condition d'usinage considérée dans le calcul éléments finis, il est obtenu $\mu = 0.7$, en accord avec les résultats de Maranhão et al. [10]. Les auteurs ont mené une étude expérimentale et numérique de l'usinage d'un acier inoxydable AISI 316L avec une plaquette de coupe en carbure revêtue multi-couche (TiCN- Al_2O_3 -TiN). Les essais de tournage avec $V_c = 100\ \text{m/min}$ et $ap = 1\ \text{mm}$ réalisés leur ont permis d'obtenir les coefficients de frottement suivants $\mu = 0.89$, $\mu = 8$ et $\mu = 0.53$ pour des avances respectives de $f = 0.05\ \text{mm/tr}$, $f = 0.1\ \text{mm/tr}$ et $f = 0.2\ \text{mm/tr}$.

3.2 Résultat de la simulation numérique

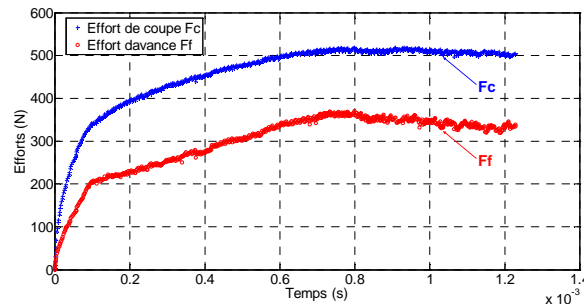


FIG. 6 – Evolutions des efforts de coupe F_c et d'avance F_f en fonction du temps ($V_c = 100\ \text{m/min}$; $f = 0.15\ \text{mm/tr}$)

Les efforts de coupe et d'avance obtenus par simulation numérique sont relevés pour $t = 1.2\ \text{ms}$ lorsqu'ils semblent se stabiliser. L'écart relatif des mesures numériques aux essais expérimentaux est de 16% pour F_c et de 24% pour F_f , voir tableau 2. Ces écarts, du même ordre que les résultats obtenus par Maranhão et al. nous permettent dans un premier temps de valider la mise en données de simulation numérique tout en soulignant que les écarts peuvent supposer qu'une approche de coupe orthogonale n'est pas parfaitement dédiée à l'étude du tournage.

	Effort de coupe F_c (N)	Effort d'avance F_f (N)
Essai de tournage	426	260
Calcul	508	343

TAB. 2 – Efforts de coupe F_c et d'avance F_f obtenus expérimentalement et numériquement ($V_c = 100\ \text{m/min}$; $f = 0.15\ \text{mm/tr}$; $ap = 1\ \text{mm}$ pour les essais et $V_c = 100\ \text{m/min}$; $f = 0.15\ \text{mm/tr}$ pour le calcul)

4 Conclusions et perspectives

Une campagne d'essais expérimentaux d'usinage et la simulation numérique du procédé ont été utilisées pour analyser l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304L avec des plaquettes revêtues multi couches. La partie expérimentale a permis de définir des plages d'avance et de vitesses de coupe acceptables pour des conditions de coupe optimales. Concernant l'approche numérique, un premier calcul a été réalisé pour valider une mise en données qui servira aux simulations numériques à venir.

Dans la suite de ces travaux, les essais de tournage se poursuivront avec la recherche de la profondeur de passe minimale. Cette recherche sera suivie d'essais d'usure avec mesure de température. D'autres nuances de revêtements ainsi qu'une configuration de plaquette non revêtue seront considérées tant pour les essais que pour les simulations numériques afin de confronter les effets de différents types de revêtement sur l'usure de l'outil coupant.

Références

- [1] Lahres M., Doerfel O., Neumüller R., Applicability of different hard coatings in dry machining an austenitic steel, *Surface and Coatings Technology*, 120, 687 – 691, 1999.
- [2] Koné F., Czarnota C., Haddag B., Nouari M., Finite element modelling of the thermo-mechanical behavior of coatings under extreme contact loading in dry machining, *Surface and Coatings Technology*, 205, 3559 – 3566, 2011.
- [3] Grzesik W., Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 355 – 369, 1999.
- [4] Grzesik W. and Nieslony P., Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating-chip interface, *Wear*, 256, 108 – 117, 2004.
- [5] Bull S. J., Jones A. M., Multilayer coatings for improved performance, *Surface and Coatings Technology*, 78, 173 – 184, 1996.
- [6] Crolet A., Contribution à l'étude de l'influence du comportement vibratoire du système « pièce-outil-machine » sur la qualité de surface obtenue en tournage de super finition, thèse de doctorat de l'INPL Nancy France, 2008.
- [7] M'Saoubi R. and Outeiro J. C., Changeux B., Lebrun J.-L., A. M. Dias, Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels, 96, 225 – 233, 1999.
- [8] Hong S. Y., Ding Y., Jeong W. C., Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, 41, 2271 – 2285, 2001.
- [9] Kumar K. V. B. S. K., Choudhury S. K., Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments, 203, 95 – 101, 2008.
- [10] Grzesik W., Determination of temperature distribution in the cutting zone using hybrid analytical-FEM technique, 46, 651 – 658, 2006.
- [11] Maranhão C., Davim J.P., Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: Numerical simulation and experimental validation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18, 139 - 156, 2010.