

Modélisation et simulation des efforts de coupe en fraisage 2.5 axes

Adel Amin AMMAR, Zoubeir BOUAZIZ & Ali ZGHAL

Unité de recherche de mécanique des solides des structures et de développement technologique « UM2SDT », Ecole Supérieure des Sciences et Techniques, BP 56 Beb Mnara 1008 Tunis, Tunisie. zoubeir.bouaziz@enis.rnu.tn

Résumé :

L'opération de fraisage est une opération d'usinage fondamentale dans l'industrie pour la production des pièces mécaniques et des moules. La productivité et la précision géométrique de la pièce fabriquée diminuent par les vibrations dues à la discontinuité du contact outil pièce et à la variation de la passe radiale provoquée par le choix de la stratégie d'usinage.

L'objectif de cette communication est de proposer un modèle d'efforts de coupe en fraisage 2.5 axes qui tient compte de la variation de la passe radiale. La simulation d'usinage est appliquée sur une poche complexe avec plusieurs stratégies d'usinage afin de déterminer les variations des efforts de coupe et leurs répartitions en fonction des conditions d'usinage.

Abstract :

The operation of milling is a fundamental operation of machining in industry for the production of the machine elements and the moulds. The productivity and the geometrical precision of the part manufactured decrease by the vibrations due to the discontinuity of the contact tool part and the variation of the radial depth caused by the choice of the strategy of machining. The objective of this communication is to propose a model of cutting forces in milling 2.5 axes which holds account of the variation of the radial depth. The simulation of machining is applied to a complex pocket with several strategies of machining in order to determine the variations of the cutting forces and their distributions according to the conditions of machining.

Mots-clefs : Fraisage 2.5 axes ; efforts de coupe ; engagement radial

1 Introduction

L'usinage par enlèvement de matière est encore à ce jour le procédé de fabrication le plus répandu. Dans les industries mécaniques de fabrication des moules et des matrices d'injection plastique, les poches sont les formes géométriques les plus rencontrées, leur évidement est considéré comme un processus difficile et complexe [1].

Durant l'usinage, le parcours de l'outil, couplé à la géométrie de l'outil et aux conditions de coupe influent sur les efforts de coupe mis en jeu ainsi que la puissance consommée [2].

Dans le cas de l'usinage de poche, l'outil travaille sur des plans successifs. Pour une profondeur de passe à une altitude donnée, l'engagement axial est constant. A l'inverse, l'engagement radial de l'outil varie en fonction de la stratégie d'usinage utilisée [3, 4]. Il est donc important de calculer à chaque instant l'engagement radial et de relier les efforts de coupe à la géométrie du parcours d'outil.

Dans ce travail, nous cherchons à quantifier l'influence de la stratégie d'usinage en fraisage 2.5 axes sur les efforts de coupe. Pour se faire, nous proposons un modèle de simulation des efforts de coupe tenant compte de la variation de l'engagement radial de l'outil.

Dans la partie suivante, nous présentons la formulation du modèle d'efforts de coupe. Ensuite, nous calculons la variation de l'engagement radial en tout point d'un trajet d'outil donné. Ce calcul est intégré dans le modèle d'efforts pour arriver enfin à modéliser les efforts de coupe tout en tenant en compte de l'engagement radial et par suite de la stratégie d'usinage choisie.

2 Formulation du modèle d'efforts de coupe

Le modèle théorique présenté dans cet article est basé sur le principe de la segmentation [5, 6]. L'outil est divisé en Nz éléments d'épaisseur constante dz , perpendiculairement à son axe (Fig 1). L'effort exercé sur une arête de coupe est obtenue par sommation des composantes des efforts qui s'appliquent sur chaque élément. Une sommation sur toutes les arêtes engagées dans la matière permet d'obtenir l'effort global exercé sur l'outil à un instant donné.

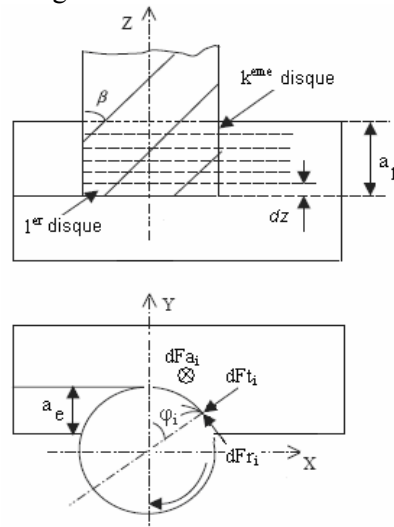


FIG. 1 Modélisation des efforts de coupe

Pour un point situé sur la $i^{\text{ème}}$ dent de l'outil, les efforts de coupe tangential dF_t , radial dF_r et axial dF_a s'appliquant au niveau du disque élémentaire k d'épaisseur dz et relatifs à la position angulaire φ peuvent s'écrire :

$$\begin{aligned} dF_{t_i}(\varphi, z) &= K_t h_i(\varphi, z) dz, \\ dF_{r_i}(\varphi, z) &= K_r dF_{t_i}(\varphi, z), \\ dF_{a_i}(\varphi, z) &= K_a dF_{t_i}(\varphi, z), \end{aligned} \quad (1)$$

Où K_t , K_r et K_a sont les coefficients spécifiques de coupe. La détermination de ces coefficients est basée sur des mesures expérimentales des efforts qui nécessitent un certain nombre d'expériences préliminaires.

La position angulaire d'une dent en contact avec la pièce à usiner est déterminée en fonction de la profondeur de passe axiale a_p et radiale a_e , du nombre de dents N , du rayon de l'outil R et de l'angle d'hélice β . L'épaisseur instantanée du copeau à un certain endroit sur le tranchant peut être rapproché comme suit :

$$h_i(\varphi, z) = f_t \sin \varphi_i(z), \quad (2)$$

Avec f_t est l'avance par dent et $\varphi_i(z)$ est la position angulaire par rapport à l'axe Y de la $i^{\text{ème}}$ dent au niveau du disque élémentaire k . Sa valeur change tout au long de la direction axiale comme suit :

$$\varphi_i(z) = \varphi + (i-1)\gamma - ((k-1)dz + \frac{dz}{2}) \frac{\tan \beta}{R} \quad (3)$$

Où

$\gamma = 2\pi / N$ est défini comme étant l'angle entre deux dents consécutives,

$\varphi = \Omega t$ avec t étant le temps, $\Omega = \pi n / 30$ est la vitesse angulaire (rad/s) et n est la vitesse de rotation (tr/min),

$\varphi_i(z)$ varie tel que $\varphi_e \leq \varphi_i(z) \leq \varphi_s$ avec φ_e est la position angulaire au moment où la dent de l'outil entre dans la pièce à usiner et φ_s est la position angulaire au moment où la dent de l'outil sort de la pièce à usiner.

L'angle entre l'entrée de dent φ_e et la sortie de dent φ_s est appelé l'angle d'engagement φ_{eng} qui peut s'écrire comme suit :

$$\varphi_{eng} = \arccos\left(1 - \frac{a_e}{R}\right) \quad (4)$$

Suivant les axes X, Y et Z, les efforts de coupe résultants pour une position angulaire φ sont donnés :

$$\begin{aligned} F_x(\varphi) &= \sum_{k=1}^{Nz} \sum_{i=1}^N \left\{ -dF_{r_i}(\varphi, z) \sin \varphi_i(z) + dF_{t_i}(\varphi, z) \cos \varphi_i(z) \right\} \\ F_y(\varphi) &= \sum_{k=1}^{Nz} \sum_{i=1}^N \left\{ dF_{r_i}(\varphi, z) \cos \varphi_i(z) + dF_{t_i}(\varphi, z) \sin \varphi_i(z) \right\} \\ F_z(\varphi) &= \sum_{k=1}^{Nz} \sum_{i=1}^N dF_{a_i}(\varphi, z) \end{aligned} \quad (5)$$

L'effort total de coupe peut être calculé comme suit :

$$F(\varphi) = \sqrt{F_x^2(\varphi) + F_y^2(\varphi) + F_z^2(\varphi)} \quad (6)$$

3 Variation de l'engagement radial

3.1 Principe de calcul

Soit un outil décrivant une passe pi d'un trajet d'usinage donné. Celui-ci laisse une trace dans la matière due à son mouvement d'avance combiné au mouvement de coupe, que nous appelons courbe enveloppe du trajet de l'outil montrée sur la FIG 2 [7]. Ainsi, la matière enlevée par l'outil à la passe suivante $pi+1$ est donc la matière comprise entre la courbe enveloppe de la passe pi et la courbe enveloppe de la passe $pi+1$.

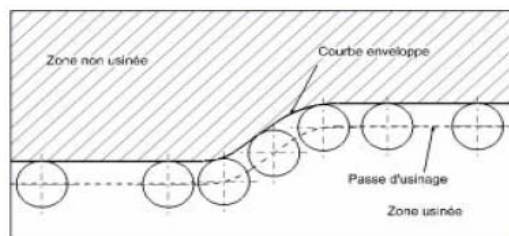


FIG. 2 Matière enlevée lors d'une passe d'usinage [7]

Connaissant la bande de matière enlevée pour une passe d'usinage, l'engagement radial est alors obtenu en calculant la largeur de la bande de matière enlevée suivant une direction

perpendiculaire à la vitesse d'avance de l'outil en tout point du trajet d'usinage [8]. Pour se faire, la méthode adaptée dans notre cas est une méthode géométrique exacte qui aboutit à une résolution analytique du problème. Le principe de cette méthode est de calculer à chaque instant la distance entre le point d'intersection de la fraise avec la courbe enveloppe de la passe précédente et le point de la fraise qui génère la courbe enveloppe de la passe en cours. Toutes les informations dimensionnelles sont extraites du logiciel de CFAO Mastercam.

3.2 Simulation des variations de l'engagement radial

Pour un trajet d'usinage donné, les calculs analytiques développés par la méthode géométrique mentionnée ci-dessus permettent de calculer les variations de l'engagement radial à chaque instant. Dans le cadre de notre travail, la simulation des variations de l'engagement radial est déterminée pour les deux types de trajets en zigzag et en contours parallèles comme montré respectivement à la FIG 3 et FIG 4. Sur ces figures, l'engagement radial est représenté par des segments de droite perpendiculaires au trajet d'usinage.

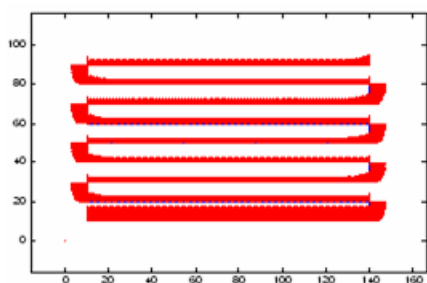


FIG. 3 Evolution de l'engagement radial pour une stratégie d'usinage en zigzag

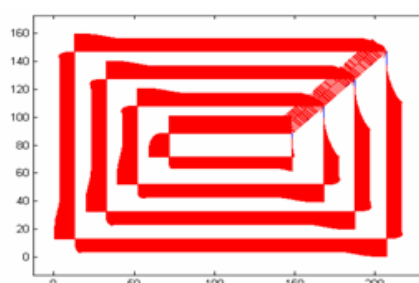


FIG. 4 Evolution de l'engagement radial pour une stratégie d'usinage en contours parallèles

Dans les deux cas, l'évolution de l'engagement radial est perturbée et plus particulièrement aux zones de changement de direction. Pour notre cas, les changements de direction sont réalisés par des angles vifs. Il en résulte un saut d'engagement radial et un instant où l'outil usine pleine matière, même pour une distance entre passes faible par rapport au diamètre de l'outil.

4 Simulation du fraisage 2.5 axes

Pour un trajet d'usinage donné, le modèle d'efforts présenté ci-dessus détermine les variations des efforts de coupe via une simulation des variations d'engagement radial. Dans notre étude, il est intéressant de l'appliquer à un trajet d'évidement de poche et plus particulièrement aux zones du trajet d'usinage qui font varier l'engagement radial. Pour être en mesure de simuler les efforts de coupe, le modèle a été implémenté sous Matlab.

4.1 Définition des essais

Pour le cas étudié, la simulation d'usinage est appliquée sur une poche de géométrie rectangulaire. Comme figuré sur la FIG 5, la stratégie d'usinage utilisée est en zigzag. L'outil employé est à deux tailles Ø26 mm avec deux dents et un angle d'hélice 30°.

Particulièrement, les conditions de travail prises pour faire la simulation ont été:

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Vitesse de rotation : | 5630 tr/ min |
| Profondeur de coupe axial : | 1.2 mm |
| Avance par dent : | 0.025 mm |

Pour ces conditions, les coefficients spécifiques de coupe sont issus de la bibliographie [9].

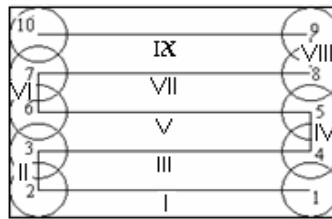


FIG. 5 Usinage d'une poche rectangulaire en zigzag

4.2 Analyse des résultats

Les courbes présentées ci-dessous représentent les composantes de la force de coupe en fonction du temps pour une stratégie d'usinage en zigzag.

On remarque bien que pour un engagement radial continue et constant (zones I, III, V, VII et IX), l'effort de coupe est aussi constant.

Les perturbations qui apparaissent sur les zones II, IV, VI et VIII correspondent aux moments où l'outil n'est plus en contact avec la matière et où l'évolution de l'engagement radial est discontinue.

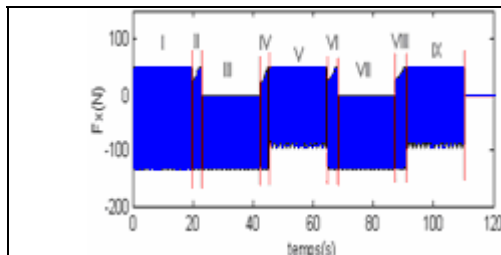


FIG.6 Efforts de coupe suivant la direction X

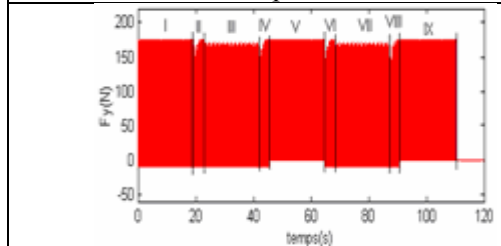


FIG.7 Efforts de coupe suivant la direction Y

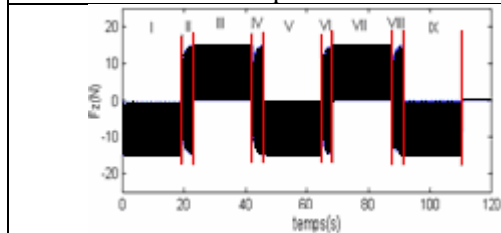


FIG.8 Efforts de coupe suivant la direction Z

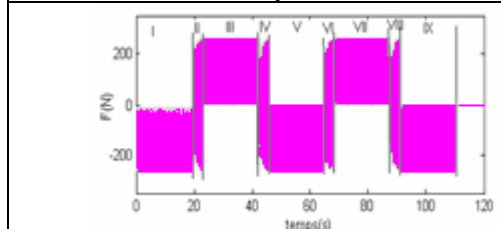


FIG.9 Effort total de coupe

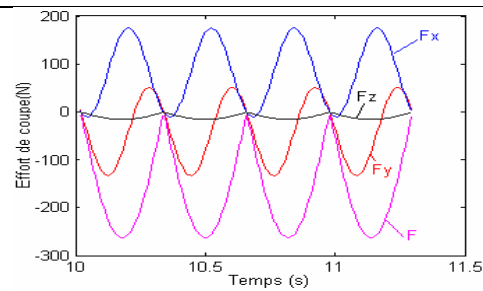


FIG.10 Efforts de coupe dans la zone I

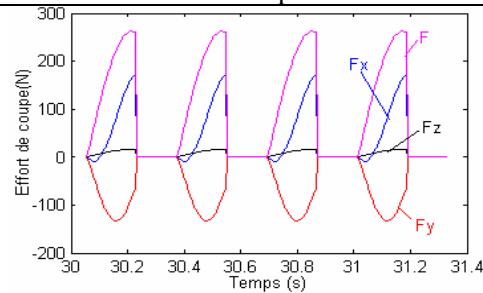


FIG.11 Efforts de coupe dans la zone III

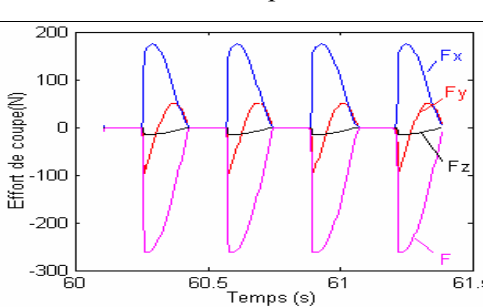


FIG.12 Efforts de coupe dans la zone V

5 Conclusions

La connaissance des zones de contact Outil-Pièce le long de la trajectoire de l'outil dans la matière est l'un des éléments essentiels permettant de simuler l'effort de coupe de l'ensemble du système Outil-Pièce. Nous avons utilisé une approche macroscopique pour le cas de fraisage avec une fraise à deux tailles.

L'objectif de ce travail est de développer un modèle pour expliquer le phénomène d'intersection Outil-Pièce et l'analyse de la variation de l'effort de coupe, ce dernier dépend de la géométrie de l'outil, des conditions de coupe, du choix de la stratégie et des zones de contact outil pièce à chaque instant le long de la trajectoire de l'outil.

C'est dans le but de mieux comprendre l'évolution de l'effort de coupe en fonction de la trajectoire de l'outil, nous avons étudié l'évolution de l'effort de coupe pour le cas d'usinage d'une poche rectangulaire en adaptant une stratégie d'usinage en zigzag.

6 Références

- [1] PATELOUP.V : « Amélioration de comportement cinématique des machines outils UGV. Application au calcul de trajets d'évidement des poches ». Ph.D.Thesis, Université Blaise Pascal Clermont II, 2005.
- [2] BENYOUCEF.A : « Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécaniste ». DEA de Génie Mécanique, Université de Batna, Juin 2006.
- [3] S. Hinduja, A. Roaydi, P. Philimis, G. Barrow: «Determination of optimum cutter diameter for machining $2^{1/2}$ -O pockets ». International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 687-702.
- [4] BENARDEAU. F: « Optimisation 2D des trajets outil d'usinage de poche ». DEA de production automatisée, Ecole Normale Supérieure de cachan, 2003.
- [5] M.C. Yoon, Y.G.Kim : « Cutting dynamic force modelling of end milling operation ». Journal of Materials Technology 155-156 (2004) 1383-1389.
- [6] E. Budak: « Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity ». International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1478-1488.
- [7] Lartigue (C), Duc (E), Affouard (A): «Tool path deformation in 5-axis flank milling using envelope surface ». Computer Aided Design, vol 35, 4, pp. 375-382, 2003.
- [8] Chanal (H) : « Optimisation des sollicitations de l'outil dans le cadre de l'usinage de poches ». DEA de Génie Mécanique et Génie Civil de l'université Blaise Pascal – Juin 2003
- [9] T.I.Seo, Intégration des déformations Outil en Génération de Trajectoires d'Usinage, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1998.