



The Impact of Arte Radius on Crack Initiation and Propagation in a Coated Cutting Tool During the Machining Operation

Khaled Bounif, Mohammed Abadi and Mohammed Nouari

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

February 16, 2024

L'impact du rayon d'arête sur l'amorçage et la propagation des fissures dans un outil de coupe revêtu durant l'opération d'usinage

K. BOUNIF^{1*}, M. ABBADI¹, M. NOUARI²

¹UTBM, ELLIADD, Pôle ERCOS, Université Bourgogne Franche-Comté, Belfort, 90010, France

²EMCS, ENSAO, BP 696, Oujda, Maroc

³LEM3, UMR-CNRS 7239, Université de Lorraine, GIP-InSIC, St-Dié-des-Vosges, France

Résumé

Le présent travail se concentre sur l'utilisation du code de calcul Abaqus, basé sur l'analyse par éléments finis, pour examiner la fissuration d'un outil de coupe revêtu de diamant. Lors du processus d'usinage, l'outil est exposé à des contraintes thermiques et mécaniques considérables. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre des milliers de degrés. De plus, la déformation plastique du matériau engendre des contraintes réactives qui entraînent des flexions et des vibrations de l'outil. Étant donné que les matériaux usinés sont rarement homogènes par nature, il existe une variation rapide des contraintes, augmentant ainsi les risques de fissuration. La combinaison des températures élevées, en particulier le choc thermique au début de l'usinage, et des vibrations peut entraîner la formation de fissures dans l'outil.

Ce travail propose de combiner la méthode des éléments finis étendus XFEM avec la méthode des éléments cohésifs pour simuler des fissures dans le revêtement d'un outil de coupe en carbure de tungstène. L'objectif est d'étudier l'effet du rayon d'arête de l'outil de coupe sur l'amorçage et la propagation des fissures. Cette approche permettra de mieux comprendre les mécanismes de fissuration et d'optimiser la conception des outils pour améliorer leur durabilité et leur performance lors de l'usinage.

Mots clés: *Usinage, Fissure, Rayon d'arête Abaqus, méthode FEM, méthode XFEM.*

1. Introduction

L'usinage a connu une grande évolution dans ces dernières années, la concurrence sévère a conduit à l'apparition de nouveaux types d'usinage tels que l'usinage à grande vitesse UGV et des machines à commande numérique CNC sans oublier l'usinage par laser, etc. Comme le cas de l'impression 3D des matériaux métalliques, les domaines de l'utilisation de ces applications d'usinage sont divers comme l'usinage aéronautique, médical, nucléaire, etc.

L'industrie aéronautique a été toujours pionnière en termes de recherche et d'innovation, pour répondre aux exigences toujours plus strictes et au besoin d'améliorer les performances techniques et la sûreté des avions. Elle doit aussi faire face à la croissance de la concurrence économique dans le domaine. Ceci a conduit, inévitablement, à l'automatisation des tâches du processus de développement des avions, en intégrant au

mieux les diverses activités y compris la conception et la fabrication. L'usinage aéronautique concerne des dizaines de milliers de composants, parfois des centaines de milliers pour les grands avions, et a besoin d'une très haute précision. En outre, il exige des qualifications pointues et une qualité de finition optimale des pièces.

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent flexions et vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes (phase) [1]. Il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil [2].

2. La méthode d'élément cohésif

L'approche CZM est l'outil le plus communément utilisé pour étudier et simuler les ruptures interraciales. Elle décrit la création et le développement d'une zone de dommages cohésifs proche du fond de fissure en reliant les ruptures micro structurales avec les champs continus qui gouvernent les déformations des fibres. Un élément CZM est donc caractérisé par les propriétés des fibres, par les conditions d'initiation de la fissure et de la fonction d'évolution de la fissure. Les modèles de zone de dommages cohésifs relient les tractions de surface cohésive.

Dans le cadre de ce travail, on a choisi un modèle à comportement bilinéaire irréversible pour bien définir l'interface entre le revêtement et le substrat d'un outil de coupe [3]. Le comportement consiste tout d'abord en une augmentation linéaire réversible de la contrainte de « traction » avec le déplacement relatif de « séparation » des nœuds. Un critère d'initiation au dommage a été atteint à la pointe de fissure cohésive qui est située au point où le déplacement atteint δ_{max} ; L'ouverture de la fissure se produit lorsque le déplacement atteint δ_c . Finalement quand l'énergie de rupture correspondant à la surface sous la courbe est atteinte, la liaison entre deux nœuds est rompue, la séparation totale des nœuds permet de simuler une propagation de fissure.

3. La méthode XFEM

Au cours des dernières années, une nouvelle méthode numérique a vu le jour et a été nommée la méthode des éléments finis étendus (XFEM). Cette dernière, contrairement à la méthode classique, se base sur l'enrichissement des nœuds par la fonction Heaviside et

les fonctions singulières afin de bien représenter la discontinuité et la singularité de la fissure. Une des bases mathématiques de la méthode XFEM est la méthode de partition de l'unité (PUFEM) proposée par Melenk et al. [4]. L'idée essentielle de cette méthode est d'incorporer des informations connues a priori sur le comportement local de la solution dans l'approximation des éléments finis. Plus précisément, les fonctions enrichies globales qui contiennent des informations sur la solution du problème, sont multipliées par les fonctions de forme nodales. Les fonctions enrichies discontinues sont incorporées dans l'espace standard des éléments finis dans le but de prendre en compte la présence des fissures. Leur étude a révélé un certain nombre de déficiences en raison de l'utilisation des fonctions asymptotiques autour de la pointe des fissures seulement. Les méthodes des éléments finis classiques imposent des conditions éminentes liées au raffinement du maillage en fond de la fissure et au remaillage en cours de propagation ; ce qui a pour effet d'augmenter le temps de calcul et de diminuer la précision des résultats. La méthode XFEM [5] montre un avantage principal qui se manifeste par la représentation de la fissure indépendamment du maillage, ce qui permet donc de mettre à jour la fissure sans avoir à remailler la pièce. Ceci se base sur le rajout dans la base des éléments finis [6] des fonctions prenant en compte la discontinuité des déplacements le long de la fissure ainsi que la forme asymptotique des déplacements singuliers en fond de la fissure.

Contrairement aux lois de séparation de traction bilinéaire utilisée pour le CZM, XFEM utilise un critère de rupture de contrainte principale maximale pour la prédiction de la fracture en fonction de la résistance et de la déformation des matériaux pour l'initiation et la propagation du dommage. XFEM excelle le CZM dans la modélisation de la croissance des fissures [6].

4. Simulation numérique

Un modèle en élément finis 2D a été réalisé dans le code de calcul Abaqus. Pour étudier la propagation de la fissure sur le revêtement d'un outil de coupe lord de l'usinage, dans les travaux des matériaux composite un problème est toujours posé pour la modélisation de l'interface lors de l'étude de la propagation des fissures, c'est comment bien défini l'interface pour la fissure suppose qu'il y a de matériaux.

Dans cette étude, on combine un modèle d'élément cohésif et la méthode des éléments finis étendus XFEM, la méthode d'élément cohésif étudier le comportement de l'interface diamant et carbure-substrat, L'interaction cohérente était basée sur un modèle de zone cohésive avec une loi bilinéaire de séparation-traction. XFEM a été appliqué au domaine de revêtement pour modéliser l'amorçage et la propagation des fissures dans le revêtement de diamant avec un critère de rupture du contraint maximal principal.

On donne un déplacement à la pièce qui l'on suppose rigide comme indique sur la figure 1

Un modèle est utilisé en raison de la symétrie de la géométrie et du chargement. Le modèle géométrique de l'échantillon représenté à la figure 1 est de 40 µm de rayon, l'angle de coupe est nul et dépouille est de 7 degrés. L'épaisseur du revêtement de diamant et du substrat en carbure est à la fois de 40 µm. La pièce est supposée être rigide avec profondeur de passe de 0.2 mm

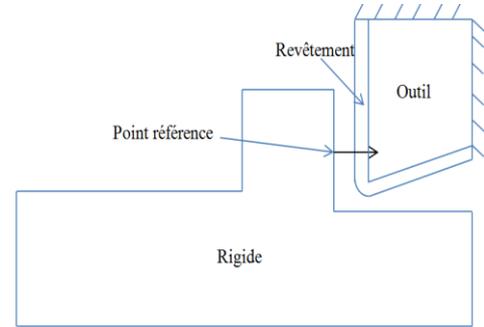


Figure 1 : Modèle élément finis

Le tableau 1 est présenté les propriétés des revêtements de diamants, les valeurs typiques ont été assignées

Matériau	Module de Young [GPa]	Coefficient de poisson	Contraint principal maximal [GPa]	Energie de rupture [J / m*2]
Diamant	1200	0.07	5.7	98

Tableau 1 : Propriété du revêtement

Le substrat en carbure a été modelé sous la forme d'un matériau élastoplastique avec durcissement isotrope obéissant à la loi de Ramberg-Osgood, leur propriété est définie au tableau 2, les propriétés des éléments cohésifs est définie sur le tableau 3.

Matériau	Module de Young [GPa]	Coefficient de poisson	Résistance à l'élasticité [GPa]	Coefficient d'écroutissage
Tungstène	619,5	0.24	3,605	0.244

Tab² leau 2 : Propriété du substrat

Résistance normale maximale [MPa]	Résistance maximale au cisaillement [MPa]	Densité d'énergie de rupture J/m*2
543	314	384

Tableau 3 : Propriété cohésif de l'interface

5. Maillage utilisée

Pour une bonne précision des résultats, un maillage optimal est nécessaire avant de procéder au calcul numérique. Le critère de maillage est basé sur une combinaison entre précision et efficacité. Les éléments utilisés dans le maillage sont de type CPS4R ce type d'élément A 4-node bilinear plane stress quadrilateral, reduced integration, hourglass control.

6. Résultats et discussions

La simulation d'une pièce sur le carbure revêtu de diamant avec des interactions cohésives et XFEM a été réalisée en utilisant ABAQUS 6.12. Dans cet exemple présenté, la pièce a été pressée 10 μm vers le bas à partir de la surface de revêtement. La figure 1 montre le contour de contraintes principal maximal dans le système après un déchargement total dans le revêtement de diamant.

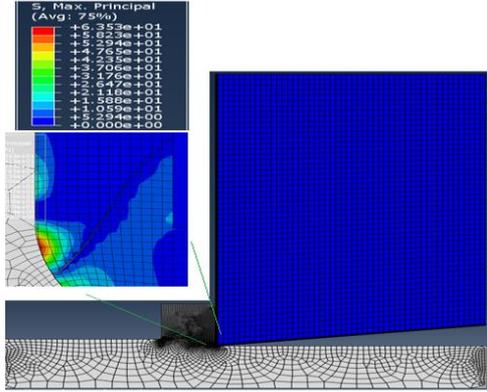


Figure 2 : l'amorçage et la propagation d'une fissure dans le revêtement de l'outil de coupe.

7-1 Effet de rayon d'arête sur l'amorçage de la fissure

Dans cette partie, nous avons varié R le rayon d'arête de l'outil de coupe, et nous avons calculé le déplacement critique qui amorce une fissure dans le revêtement de l'outil de coupe à plusieurs modèles de Young, la figure 3 illustre la variation de déplacement en fonction du module de Young avec 3 rayons d'arête déferant. Nous avons constaté que le déplacement diminue avec l'augmentation du module de Young et ceci est dû à la rigidité du matériau, et nous avons constaté aussi que le déplacement et augmente avec l'augmentation de rayon d'arête.

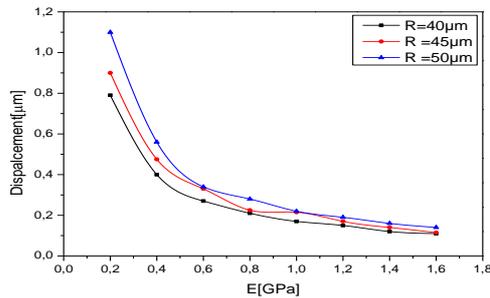


Figure 3 : La variation du déplacement avec le module de Young avec déferant rayon d'arête.

7-2 Effet de rayon d'arête sur la propagation de la fissure

Le but de cette partie est l'étude de la propagation de la fissure pour ça nous avons varié R le rayon d'arête de l'outil de coupe, et nous avons calculé le déplacement nécessaire qui est propage la fissure dans le revêtement de l'outil de coupe jusqu'à l'interface du revêtement-substrat à plusieurs modules de Young, la figure 4 illustre

la variation de déplacement en fonction de la modèle de Young avec 3 rayon d'arête déferant.

Nous avons constaté que le déplacement diminue avec l'augmentation du module de Young et ceci est dû à la rigidité du matériau, et nous avons constaté aussi que le déplacement et augmente avec l'augmentation de rayon d'arête

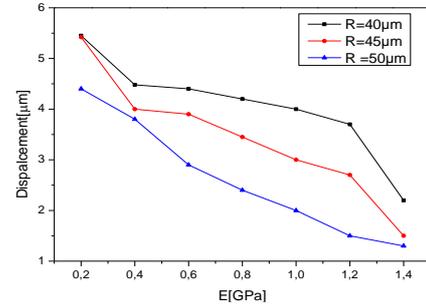


Figure 4: La variation du déplacement avec le module de Young avec déferant rayon d'arête.

Conclusion

- Le déplacement diminue avec l'augmentation du module de Young
- le déplacement augmente avec l'augmentation de rayon d'arête
- Donc pour protéger l'outil de coupe contre les fissures il faut choisir un revêtement avec :
 - Module de Young petit
 - Un grand Rayon d'arête

Références

- [1]. K. Bounif, M. Abbadi, M. Nouari
A Numerical Study of the Cracking Behaviour of Coated Tungsten Carbide Cutting Tools During the Machining Proces, *Tungsten Carbides: Advances in Research and Applications*, 2023, pp. 179–193
- [2]. P. H. Geubelle and J. S. Baylor. Impact-induced delamination of composites: a 2d simulation. *Composites Part B*, 29B :589–602, 1998.
- [3]. S. Han. Mechanisms and modeling of white layer formation in orthogonal machining of steels. PhD thesis, George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, May 2006
- [4]. JM Melenk, I Babuka. The partition of unity finite element method: Basic theory and applications.
- [5]. Bounif K, Abbadi M, Atlati S, Nouari M, Selvam R. Modeling and Numerical Simulation of the Cracking of a Diamond-Coated Cutting Tool during Machining. *KEM* 2019;820:29–39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.820.29>.
- [6]. K. Bounif, M. Abbadi, M. Nouari, R. Selvam, A numerical approach for crack-induced damage in tungsten carbide cutting tools during machining.