

Analyse du frottement aux interfaces pièce-outil-copeau au cours de l'usinage d'un acier 42CrMo4

Farhat Zemzemi^{1,2}, Joël Rech¹, Wacef Bensalem², Philippe Kapsa³, Abdelwaheb Dogui²

¹ LTDS, UMR 5513 CNRS-ECL-ENISE-ENSMSE, 58 rue Jean Parot 42000 Saint Etienne France

² LGM, ENIM, rue Ibn Aljazzar 5019 Monastir Tunisie

³ LTDS, UMR 5513 CNRS-ECL-ENISE-ENSMSE 36 avenue Guy de Collongue Ecully cedex 69134, France

joel.rech@yahoo.fr

Résumé :

Dans le but de simuler le contact aux interfaces outil – pièce – copeau lors d'une opération d'usinage, un nouveau dispositif expérimental de frottement a été conçu. Ce tribomètre permet de caractériser des frottements dans des conditions très sévères via un contact sphère/plan. Dans cette configuration de contact, le coefficient apparent de frottement, relevé à partir des mesures d'efforts de frottement, est la somme de deux quantités : une partie due à la déformation de la pièce et une partie due au frottement entre les deux surfaces. L'objectif de ce travail est de présenter une approche numérique utilisée pour dissocier les grandeurs liées à la déformation de la pièce et celles liées à l'adhésion en vue d'identifier une loi de frottement. Cette démarche est appliquée au cas de l'usinage de l'acier 42CrMo4 traité à 290 HB par un outil de coupe en carbure revêtu TiN.

Abstract :

In order to simulate the contact at tool – chip – interfaces during the machining operation, a new experimental friction device has been developed. This tribometer permits to characterize the sphere/plane contact under very extreme conditions. Sliding speed, allowed using this device, can reach 6 m/s under very high contact pressures up to 3 GPa. The apparent friction coefficient, provided by the ratio between the tangential and normal forces, is measured. In this contact configuration, it is assumed that this coefficient can be divided into two components: an adhesive coefficient, due to the tribological interaction between antagonist contact surface, and a plastic deformation coefficient caused by plastic deformation of surfaces. The aim of this paper is to present the numerical method used to identify the adhesion component from the apparent friction coefficient in order to develop a new friction law characterizing the contact at tool – chip – interfaces during the machining operation. ABAQUS/Explicit© software has been used to simulate the friction test.

Mots-clefs :

Frottement, Usinage, simulation numérique

1 Introduction

L'utilisation d'outils de simulation numérique est la meilleure façon d'aboutir à une prédétermination techniquement et économiquement fiable des phénomènes thermiques et tribologiques, qui gouvernent l'usure des outils durant une opération d'usinage d'après les travaux de Taylor *et al* (1907), Trigger et Chao (1956), Hong-Tsu Young et al (1996) et dernièrement Rech et al (2006). Cependant, modéliser une opération d'usinage nécessite la

connaissance d'un grand nombre de paramètres et de lois, notamment les lois tribologiques qui régissent le contact outil-pièce que la majorité des modèles actuels négligent.

Dans le but de modéliser le frottement aux interfaces outil/pièce/copeau durant une opération d'usinage, un nouveau tribomètre a été développé. Ce dispositif, utilisant une configuration de contact sphère/plan, est capable de réaliser des essais de frottement à des pressions allant jusqu'à 3 GPa et des vitesses supérieures à 6 m/s.

Le coefficient de frottement apparent, relevé directement à partir des mesures d'efforts de frottement, est la somme de deux composantes : une composante due à la déformation du matériau, qui correspond à un coefficient de labourage, et une autre composante adhésive. Des analyses numériques et analytiques complémentaires sont nécessaires pour identifier le vrai coefficient de frottement entre la pièce et le pion.

Dans ce travail nous allons présenter, après une description du dispositif expérimental, une méthode numérique utilisée pour dépouiller les essais de frottement. Par la suite une loi de frottement caractérisant le contact aux interfaces outil – pièce – copeau, dans le cas de l'usinage de l'acier 42CrMo4 par un outil carbure revêtu TiN, sera développée.

2 Description du tribomètre

La vue générale du dispositif utilisé dans ce travail est présentée par la figure 1. Ce tribomètre est basé sur le principe proposé par Olsson *et al* (1998): Un pion instrumenté frotte sur une surface régénérée par un outil de coupe. Cette configuration nous a permis de réaliser des essais de frottement à des vitesses de glissement et des pressions de contact suffisantes pour simuler les contacts produits aux interfaces outil-pièce-copeau lors d'une opération d'usinage Zemzemi *et al* (2006).

Le pion, obtenu à partir d'une tige en carbure de tungstène (WC/Co) à extrémité sphérique, est fixé à un dynamomètre permettant de mesurer les deux composantes des efforts de frottement (effort normal et tangentiel). Ce dernier a la possibilité de se déplacer sous l'action d'un vérin pneumatique afin d'appliquer un effort normal qui peut aller jusqu'à 4000 N. Afin de bénéficier d'une large gamme de vitesse de frottement, l'ensemble a été placé sur un tour conventionnel.

La surface de contact pion-plan est régénérée par un outil de coupe ; Celui-ci coupe la matière à la même vitesse que la vitesse de frottement. De plus il est doté d'une vitesse d'avance f , choisie de façon à obtenir un bon état de surface et à enlever la couche affectée (thermiquement et mécaniquement) par le passage du pion. Cette avance est fixée, pour tous nos essais, à 0.3 mm/tr.

Afin de faire varier la pression de contact, d'un essai à un autre, nous avons utilisé des pions de différents diamètres (9, 13 et 17 mm). Pour un effort normal de 1000N, les pressions de contact calculées, sont respectivement, 2800 MPa, 2200MPa et 1700 MPa

Les essais de frottement ont été faits sur des pièces en acier 42CrMo4 en utilisant des pions carbure revêtus TiN (PVD). Le coefficient de frottement apparent est obtenu à partir de la mesure des efforts de frottement par la relation suivante :

$$\mu_{app} = Ft / Fn \quad (1)$$

Les conditions d'essais sont présentées dans le tableau 1.

Vitesse (m/s)	0.3 jusqu'à 6.4
Effort normal (N)	1000
Pressions (MPa)	1600, 2200 et 2800

Tableau 1 : Conditions d'essais

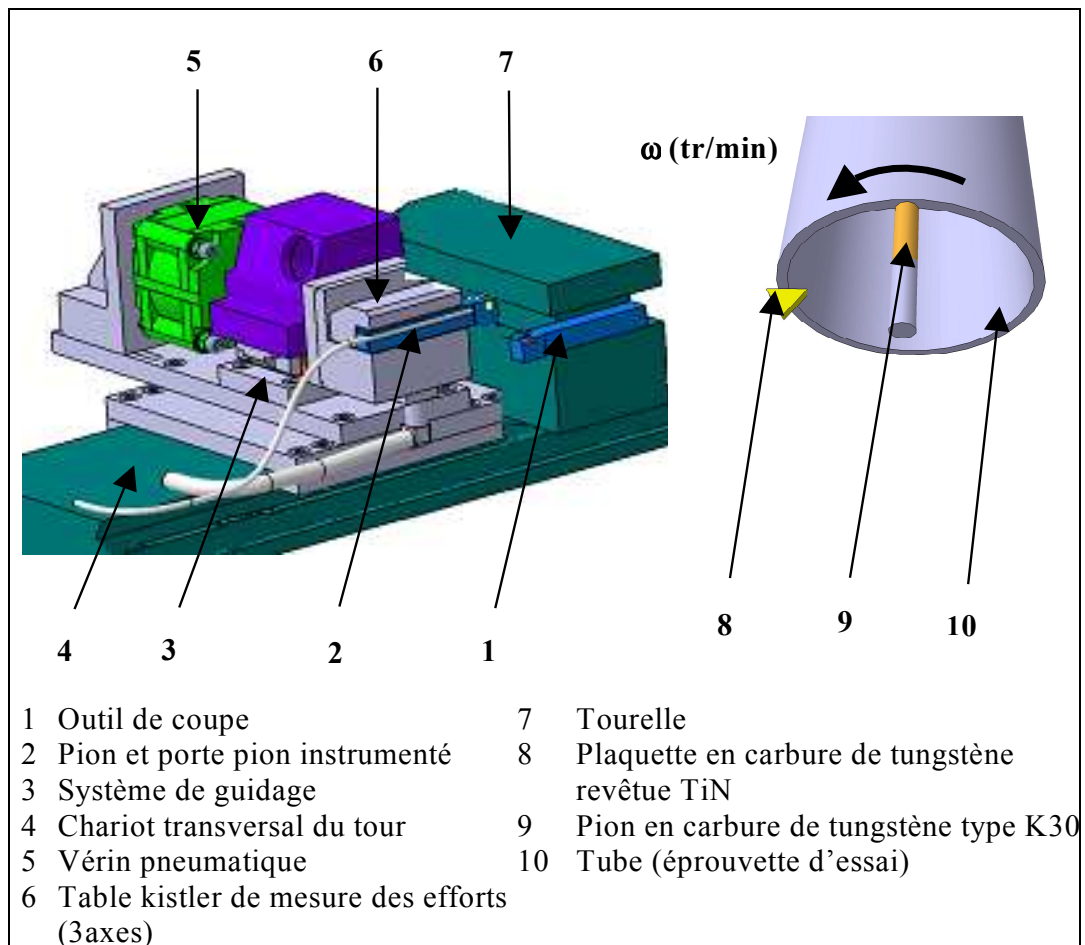


FIG. 1 : Vue générale du tribomètre

3 Dépouillement des essais de frottement

Dans un essai de rayage, la force de frottement d'un outil contre un matériau est décomposée, d'après le modèle développé par Bowden et Tabor depuis les années 50, en deux contributions indépendantes représentant respectivement les phénomènes d'adhésion au niveau du contact réel et de déformation volumique par labourage. Donc le coefficient de frottement apparent donné par la formule (3) peut être donc décomposé en deux parties dont l'importance relative varie selon le couple considéré et les conditions de contact

$$F = F_{adhésion} + F_{déformation} \quad (2)$$

$$\mu_{app} = \frac{F_t}{F_n} = \mu_{ad} + \mu_{def} \quad (3)$$

Le but de cette partie est d'identifier, à partir du coefficient de frottement apparent, la partie adhésive due à l'interaction tribologique entre la pièce et le pion.

3.1 Méthode numérique : simulation de l'essai de frottement

Un modèle 3D avec couplage thermomécanique, développé sous ABAQUS/Explicit©, est utilisé pour simuler nos essais de frottement. La figure 2 présente la vue générale de ce modèle

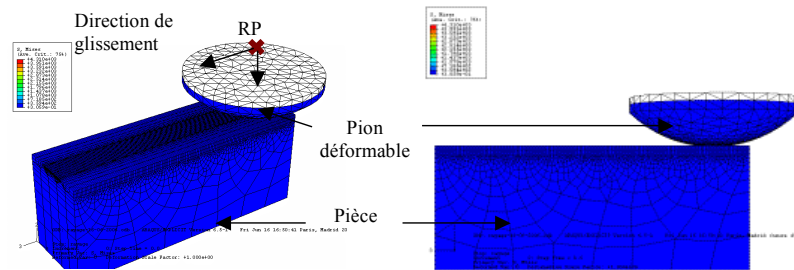


FIG. 2: Modèle numérique

Le pion, ayant une forme sphérique, est considéré déformable, conducteur de chaleur. Il est constitué de 9800 éléments tétraédriques de type C3D4T. Le mouvement du pion est piloté par son point de référence RP. Une loi élasto-plastique a été introduite pour modéliser le comportement mécanique du matériau de pion caractérisé par un module élastique $E=630\text{GPa}$, $\nu=0,22$, $R_e=5250\text{MPa}$ et $R_m=10453\text{MPa}$.

La pièce est modélisée par un parallélépipède de 42970 éléments hexagonaux dont les éléments de la surface de contact ont des petites tailles ($50\mu\text{m}$) afin d'avoir plus de précision sur les résultats. Les éléments de la base de la pièce sont fixés.

Un modèle du type Johnson et Cook est utilisé pour modéliser le comportement mécanique du matériau de la pièce :

$$\bar{\sigma} = (A + B \bar{\epsilon}_p^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_{p0}} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (4)$$

Avec $A=792\text{MPa}$, $B=510\text{MPa}$, $n=0.26$, $C=0.014$, $m=1.03$, $\dot{\epsilon}_0=1/\text{s}$, $T_{melt}=1570\text{°C}$ et $T_{room}=23\text{°C}$. Barge *et al* (2005)

Les propriétés physiques de l'acier sont présentées dans le tableau 2.

Densité ρ (kg/m ³)	Module élastique (GPa)	Coefficient de Poisson ν	Chaleur spécifique C_p (J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .C ⁻¹)	T_{melt} (°C)
7800	200	0.3	477	0.046	1530

Tableau 2 : Propriétés physiques de l'acier 42CrMo4, Barge *et al* (2005)

Le principe de la méthode numérique consiste à tracer, pour chaque condition, la variation du coefficient de frottement apparent en fonction du coefficient d'adhésion qui est un paramètre d'entrée pour notre modèle. Par la suite nous déterminons μ_{ad} qui correspond à μ_{app} expérimental.

Considérons un exemple de simulation d'un essai avec un pion 9 mm ($P=2800\text{MPa}$) et une vitesse de glissement de 2.5 m/s où la température initiale est 350°C. L'évolution du coefficient de frottement apparent en fonction du coefficient d'adhésion, obtenue par la méthode numérique, est présentée dans la figure 3.

Le résultat expérimental montre que μ_{app} , dans ces conditions, est de l'ordre de 0,28 qui correspond à μ_{ad} égal à 0.254. Donc la part de labourage ne représente que 10% de μ_{app} , ce qui est logique pour le frottement dans le cas des aciers d'après les travaux de Lancaster (1973).

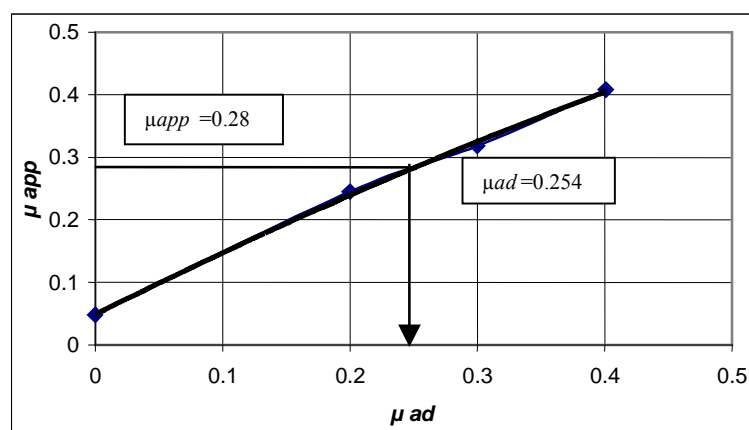


FIG. 3: Détermination du coefficient d'adhésion par la méthode numérique pour un essai de frottement à 2.5m/s et P=2800MPa

Par conséquent, en première conclusion, cette méthode numérique nous permet de trouver une bonne estimation du coefficient d'adhésion:

$$\mu_{ad} \sim 0.9 \cdot \mu_{app} \quad (5)$$

Ce modèle numérique permet, aussi, d'estimer les températures de contact pour toutes les conditions en introduisant la température initiale et μ_{ad} relatifs à la vitesse et à la charge appliquées à chaque essai. Le tableau 3 présente les conditions d'essais et les résultats obtenus.

Pression de contact (MPa)	Vitesse de glissement (m/s)	Température moyenne de contact	μ_{app} (expérimental)	μ_{ad} (modèle numérique)	μ_{ad} (modèle développé)
2801	0.4	526	0.54	0.49	0.5
2812	0.5	545	0.53	0.48	0.48
2935	1	610	0.4	0.33	0.33
2840	1.6	651	0.3	0.27	0.26
2830	2	674	0.25	0.23	0.23
2790	2.5	696	0.23	0.21	0.20
2750	3.3	726	0.21	0.17	0.17
2759	4	746	0.2	0.16	0.16
2701	5	769	0.19	0.17	0.16
2788	6.4	803	0.18	0.16	0.16
2273	0.3	492	0.59	0.53	0.50
2243	0.4	508	0.56	0.50	0.50
2316	1	588	0.41	0.37	0.35
2258	1.6	628	0.3	0.27	0.27
2312	2	653	0.26	0.23	0.24
2241	2.5	673	0.23	0.21	0.21
2188	4	720	0.2	0.18	0.17
1615	0.5	500	0.5	0.45	0.48
1648	1.6	599	0.32	0.29	0.29
1617	2	619	0.27	0.24	0.26
1619	2.5	640	0.25	0.23	0.23
1636	3.3	670	0.22	0.20	0.20

Tableau 3 : Conditions et résultats d'essais de frottement de 42CrMo4 et des pions carbure revêtus TiN

Suite à cette étude, une loi de frottement caractérisant le contact aux interfaces outil – Pièce – Copeau a été développée.

$$\mu_{ad} = 5.56 \cdot 10^{-7} T^{-3.3008} \cdot P^{0.285} - 0.018 \text{ pour } 545 < T < 746 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(6)

$$\mu_{ad} = 0.5 \text{ si } T < 545^\circ\text{C} \text{ et } \mu_{ad} = 0.16 \text{ si } T > 746^\circ\text{C}$$

Avec

T : la température moyenne de contact ($^\circ\text{C}$)

P : pression moyenne de contact (MPa)

4 Conclusions

Un nouveau dispositif expérimental a été développé pour caractériser le contact aux interfaces outil-pièce-copeau durant une opération d'usinage. Une étude numérique complémentaire a été utilisée pour dépouiller les essais de frottement. Cette étude a montré que le coefficient de labourage dans le cas de rayage de l'acier 42CrMo4 par une sphère ne dépasse pas le 10% du coefficient apparent. Elle nous a également permis de déterminer les températures moyenne de contact pour chaque condition. Une loi de frottement reliant le coefficient de frottement, la température et la pression de contact a été développée.

Références

- Barge, M. 2005 Experimental and numerical study of abrasive cutting mechanisms. Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon (France) N° 2005-17.
- Hong-Tsu Young 1996 Cutting temperature responses to flank wear. *Wear* **201**, 117-120.
- Lancaster, J. K. 1973 Basic mechanisms of friction and wear of polymers. *Plastics & polymers*. **41**, 297-306.
- Olsson, M., Soderberg, S., Jacobson S., Hogmark S. 1989 *Int. J. Mach. Tools Manufact.* **29(3)**, 370-390
- Rech, J. 2006 Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool-chip interface in orthogonal dry cutting. *Surface and Coatings Technology*. **200/16-17**. 5132-5139
- Taylor, F.W. 1907 On the Art of Cutting Metals. *Trans ASME* **28**, 31-248.
- Trigger, K.J., Chao, B.T., Dupond, J., Le Duc.A.M., 1956 The Mechanism of Crater Wear of Cemented Carbide Tools. *Trans. ASME*. **78**, 326-346..
- Zemzemi, .F., Rech, J., Ben Salem, W., Kapsa, P., Dogui, A., 2006 Characterization of friction properties at the tool-chip-workpiece interfaces during the high speed dry machining of steels. 5th International Conference on High Speed Machining. ISBN 2-900781-60-4, 229-235. Metz (France).