Mesure du frottement en forge à froid par l'essai de forgeage en T

Eric Felder, Qi Zhang

▶ **To cite this version:**

Eric Felder, Qi Zhang. Mesure du frottement en forge à froid par l'essai de forgeage en T. 21èmes Journées internationales francophones de tribologie - JIFT 2009, May 2009, Compiègne, France. p. 181-189. hal-00725484

HAL Id: hal-00725484

https://minesparis-psl.hal.science/hal-00725484

Submitted on 24 Sep 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conception, Fabrication et Durabilité

5-6 mai 2009 – Compiègne – France

MESURE DU FROTTEMENT EN FORGEAGE A FROID PAR L'ESSAI DE FORGEAGE EN T

MEASUREMENT OF FRICTION IN COLD FORGING BY THE T-SHAPE FORGING TEST

E. Felder, Q. Zhang

CEMEF (Centre de Mise en Forme des Matériaux) - UMR Mines ParisTech-CNRS 7635
Ecole des Mines de Paris, BP207, F06904 Sophia-Antipolis (France)

Résumé

Après une revue critique des essais classiques de frottement en forge à froid, cet article présente un nouvel essai permettant la mesure du frottement sur la surface latérale d'un lopin : le forgeage en T, combinant écrasement et extrusion d'un cylindre entre un tas plat et une matrice présentant un sillon en V. Les simulations numériques montrent que la courbe force F-course C et la hauteur de la partie extrudée H sont sensibles au frottement. Les coefficients de frottement (Coulomb, Tresca) sont déduits de la pente dF/dC dans le 1er stade d'essai et du couple final (F_f, H_f). Par simulation numérique on a optimisé la géométrie de la matrice. Des essais ont permis de vérifier le modèle et de mesurer le frottement induit par phosphatation/savonnage, une huile, un mélange phosphatation/savonnage/huile.

Abstract

After a critical review of the classical friction tests used in cold forging, this paper presents the T-shape compression, a new friction test combining compression and extrusion of a cylinder between a flat punch and a V-grooved die. It allows to measure friction on the cylindrical surface of the billet. The numerical simulations demonstrate that the curve force F-stroke C and the height of the extruded part H depend on friction. The Coulomb and Tresca friction coefficients are estimated starting from the slope dF/dC during the 1st step of the test and the final couple (F_f, H_f). With numerical simulation one optimised the geometry of the V-groove. Experimental results are in good agreement with the model and provide friction induced by a phosphate/soap layer, an oil, a phosphate/soap layer with oil.

1. INTRODUCTION

Les diverses opérations de forge à froid : l'extrusion, l'étirage, l'écrasement et le refoulement d'extrémité, sont largement utilisées pour réaliser directement aux cotes d'utilisation de nombreuses pièces. Le frottement du métal sur les outils est un élément déterminant de ces opérations : il conditionne la force de forgeage, la qualité de surface du produit et la durée de vie des outils. Or la forge à froid des aciers se caractérise par des conditions de contact métal/outil souvent très sévères [1-3] :

- pressions de contact p élevées, pouvant atteindre 2500 MPa ;
- grandes déformations et fortes extensions de surface δ, atteignant 3000 %
- élévations de température non négligeables, jusqu'à 200°C.

Il faut donc utiliser des lubrifiants très efficaces. Pour des opérations peu sévères, une lubrification à l'huile est possible. Mais le lubrifiant le plus courant est le film de phosphate de zinc revêtu de savon, un procédé de lubrification par film solide. Pour les opérations très

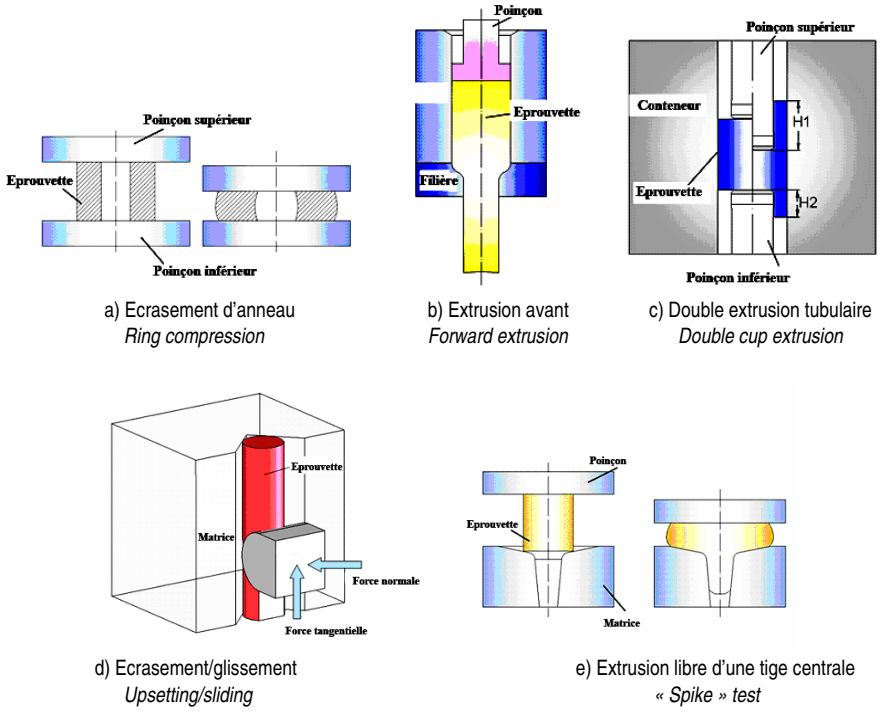
sévères produisant, du fait de passes successives d'étirage et d'extrusion, une extension de surface élevée et un fort amincissement du revêtement solide, on ajoute une huile, ce qui correspond à un mode de lubrification « mixte » solide/liquide [1,4]. Il faut noter que, tant en étirage qu'en extrusion, c'est la surface latérale du lopin qui frotte sur les outils, surface dont la rugosité est inférieure à celle des surfaces planes des extrémités [5]. Enfin, dans les gammes de forgeage automatiques, les lopins sont découpés par cisaillage d'une barre préalablement revêtue et étirée : leurs surfaces d'extrémité ne sont donc pas revêtues [1,6].

Afin de réduire les coûts et les délais de conception et mise au point des opérations, industriels et scientifiques utilisent de plus en plus les logiciels de simulation numérique par éléments finis [7] : on optimise ainsi la gamme de forgeage pour ne pas surcharger les presses et les outils et éviter la formation de défauts sur les pièces. Ces simulations nécessitent la connaissance du frottement dans les opérations. Le frottement est généralement caractérisé par le coefficient de frottement de Tresca $\overline{m}$ ou de Coulomb μ. Pour un métal de contrainte d'écoulement plastique σ_0, la cission de frottement τ s'écrit [3] :

$$\tau = \overline{m}\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (0 \le \overline{m} \le 1) \quad ou \quad \tau = \mu p \tag{1}$$

2. LES ESSAIS DE FROTTEMENT EN FORGE A FROID

Essais classiques



a) Ecrasement d'anneau
Ring compression

b) Extrusion avant
Forward extrusion

c) Double extrusion tubulaire
Double cup extrusion

d) Ecrasement/glissement
Upsetting/sliding

e) Extrusion libre d'une tige centrale
« Spike » test

Fig. 1 Essais pour la mesure du frottement en forge à froid
Friction tests for cold forging

La figure 1 présente les cinq essais les plus utilisés à ce jour en forge à froid. Nous avons comparé leurs possibilités de mesure du frottement dans l'extrusion d'un lopin issu d'une barre d'acier préalablement phosphatée-savonnée, puis étirée et cisaillée [8]. La

compression d'anneau entre deux tas plats [9] permet, par simple mesure de l'évolution du diamètre interne, d'estimer le coefficient de frottement des surfaces planes de l'anneau sur les outils : le diamètre interne est d'autant plus faible que le frottement est plus élevé (figure 1a). Mais du fait de ses inconvénients : impossibilité de mesurer le frottement sur les surfaces latérales, p et δ relativement faibles, il est jugé assez peu représentatif du forgeage à froid où il fournit des valeurs de coefficient de frottement plus élevées que celles déduites de l'essai de double extrusion tubulaire [10]. L'extrusion avant (figure 1b) est bien représentative d'une opération industrielle. Le coefficient de frottement lopin/conteneur peut être déduit de la pente d'évolution de la force avec la course [11]. Mais diverses conditions le long de la filière sont différentes de celles le long du conteneur : déformation et rugosité du métal, pression, épaisseur du film lubrifiant, ce qui peut induire une différence de frottement [8,12]. Un désaccord entre expérience et simulation numérique a été observé si l'on suppose le frottement uniforme dans l'opération [11]. Ceci complique l'interprétation de cet essai. En outre, un jeu complet d'outillage (poinçon, conteneur, filière) doit être réalisé si on change le diamètre du lopin. Dans la double extrusion tubulaire [13,14], un lopin, inséré dans un conteneur fixe, est déformé entre un poinçon supérieur mobile et un poinçon inférieur fixe ; on obtient un produit avec deux parties tubulaires, de hauteur H1 et H2 (figure 1c). La force de frottement exercée par le conteneur sur le lopin favorise l'extrusion supérieure : ainsi H1/H2 augmente avec le frottement métal/conteneur. Cet essai, très attractif, présente toutefois des inconvénients [8] : pression de contact lopin/conteneur limitée (< 900 MPa), faible expansion de surface, forte sensibilité à la rhéologie du métal ; en effet, le rapport H1/H2 décroît fortement quand l'indice d'écrouissage du métal augmente [14]. L'essai de compression/glissement [4,6] s'apparente à un essai de rayure [15] : l'indenteur (cylindre de rayon R) vient glisser avec une pénétration normale d et une vitesse tangentielle V fixées sur le lopin (figure 1d). Le frottement est estimé à partir de la mesure des forces normale et tangentielle. On peut aisément modifier la vitesse V, la température d'essai et la déformation du métal qui augmente avec d/R. Mais p et δ sont limitées [8]. L'extrusion libre d'une tige centrale (figure 1e) [16,17] est un forgeage axisymétrique combinant écrasement et extrusion. L'outillage est constitué d'un tas plat et d'une matrice avec une cavité conique centrale se raccordant à la partie plane par un petit arrondi. Une augmentation du frottement qui réduit l'expansion périphérique et favorise l'extrusion augmente la force et la hauteur extrudée. Mais, comme l'essai de compression d'anneau, il ne caractérise que le frottement de l'outil sur les surfaces planes du lopin.

Nous avons donc développé un nouvel essai : le forgeage en T [18] qui est bien représentatif de la forge à froid et permet la mesure du frottement sur la surface latérale d'un lopin dont le diamètre peut varier dans certaines limites. Nous présentons le principe de l'essai, son étude par simulation numérique, la validation expérimentale de la simulation numérique et son application à la caractérisation de trois conditions de frottement.

Principe de l'essai de forgeage en T

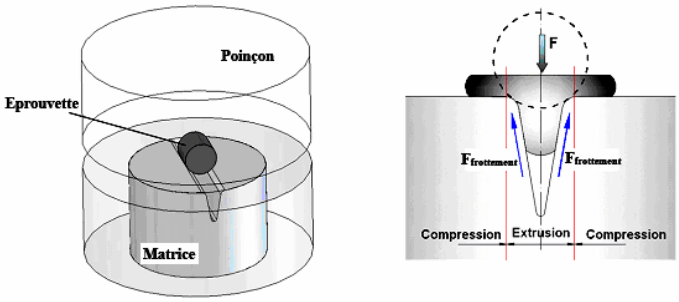


Fig. 2 Principe de l'essai de forgeage en T
Principle of the T-shape compression test

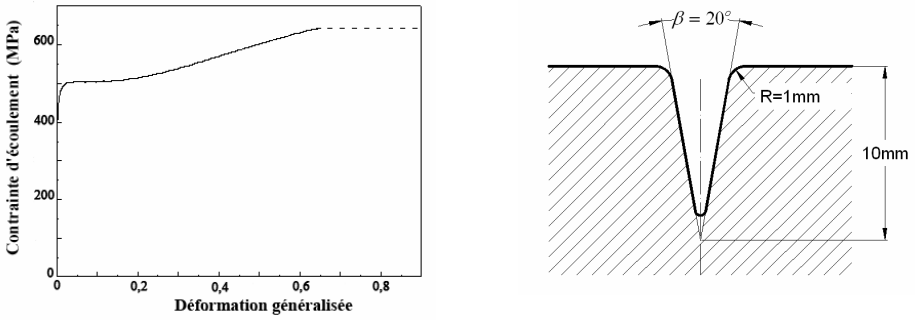
L'essai comprend trois éléments : un tas plat (poinçon), l'éprouvette cylindrique et une matrice avec une rainure en V (figure 2). La section du produit formé évoque un « T », ce qui explique le nom donné à l'essai. Le revêtement solide de la surface latérale du lopin est directement en contact avec le poinçon et la matrice. Pour tester un lubrifiant liquide, on remplit la rainure de la matrice avec le lubrifiant. Le lopin est initialement et durant tout l'essai parfaitement aligné sur la direction de la rainure en V. Durant le rapprochement du poinçon, une partie du métal est extrudée dans la rainure, l'autre est écrasée entre le poinçon et la partie plane de la matrice (figure 2). La géométrie de la rainure et le frottement le long des outils contrôlent le partage de matière entre ces deux écoulements et la forme finale du produit. Par ailleurs, comme le produit fini présente des parties plates, la force est une fonction croissante du frottement [3]. Cet essai présente divers avantages :

- Deux grandeurs, la force et la géométrie du produit, sont sensibles au frottement.
- Seule la surface latérale du lopin est en contact avec les outils.
- La rainure sert de réservoir naturel à un éventuel lubrifiant liquide.
- L'essai implique des conditions de déformation sévères, comprenant l'extrusion et l'écrasement. L'extension de surface, la déformation généralisée et la pression maximale y atteignent des valeurs élevées (cf. ci-dessous).
- Le coût des outils est plus faible que celui des outils utilisés en extrusion avant ou en double extrusion tubulaire.
- Un même jeu d'outils peut être utilisé avec des lopins de diamètres différents.

3. ETUDE THEORIQUE DE L'ESSAI PAR SIMULATION NUMERIQUE

Conditions de la simulation numérique

Le logiciel de calculs implicites tridimensionnels FORGE2005® [19] est utilisé pour simuler numériquement l'essai et en faire l'étude théorique et l'optimisation. A cause des deux plans de symétrie de l'essai, seul un quart de la pièce est maillée avec 5875 éléments tétraédriques. Le matériau est un acier doux type AISI 1010 ou C10C. Le lopin, préalablement phosphaté/savonné et étiré, a une longueur L égale à son diamètre D =7 mm. Il est supposé élasto-plastique, avec un module d'Young et un coefficient de Poisson égaux respectivement à 207 GPa et 0,29.



a) Courbe d'écrouissage du métal- *Stress-strain curve of the metal* b) Géométrie du sillon- *Geometry of the V-groove*

Fig. 3 Conditions de la simulation numérique de l'essai de forgeage en T
Conditions of the numerical simulation of the T-shape forging test

La courbe d'écrouissage du lopin a été obtenue par compression uniaxiale (figure 3a). Des essais effectués à diverses vitesses d'écrasement ont montré que la contrainte d'écoulement dépend très peu de la vitesse de déformation et cet effet a été négligé [18]. Dans le domaine des grandes déformations ($\varepsilon > 0{,}64$), nous supposons que le matériau ne s'écrouit plus, hypothèse qui a été vérifiée expérimentalement [18]. Pour bien simuler le

comportement plastique de l'acier, la courbe d'écrouissage est implémentée points par points. Le frottement du métal sur les outils est représenté par un coefficient de Tresca $\overline{m}$ ou de Coulomb μ (relations (1)). La forme de la matrice retenue pour les calculs présentés ci-dessous est donnée sur la figure 3b ; le rayon d'entrée de la rainure R, son angle total β et sa profondeur d (hors arrondi terminal) sont égaux respectivement à 1 mm, 20º et 10 mm. Les outils sont supposés rigides : nous avons constaté qu'une simulation avec outil élastique produit des résultats identiques [18].

Résultats théoriques

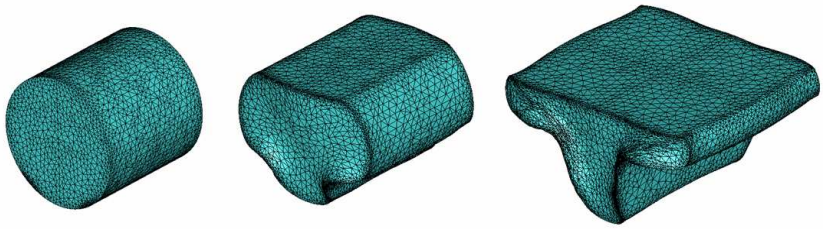


Fig. 4 Géométrie du lopin pour les courses C= 0 – 3 et 4,6 mm (de gauche à droite)
Geometru of the workpiece for the strokes C=0 – 3 and 4.6 mm (from left to right)

Cette étude est ici effectuée avec un frottement de Tresca. La simulation montre que le processus de déformation de l'éprouvette comporte deux étapes principales schématisées sur la figure 4 :

- Dans un premier temps, le métal situé dans la partie centrale s'enfonce dans la rainure, la partie périphérique restant rigide ; la force F augmente linéairement avec la course C, quand la course augmente de 1 mm à 3 mm (figure 5a).
- Ensuite la partie périphérique est écrasée entre les parties planes des deux outils ; Le produit devenant de plus en plus plat, la force augmente fortement avec la course (figure 5). Quand la course C est égale à sa valeur maximale, 4,6 mm, la déformation généralisée maximale est de l'ordre de 3, la pression de contact maximale vaut 1900 MPa et l'expansion de surface atteint 50 %, ce qui confirme la sévérité de l'essai.

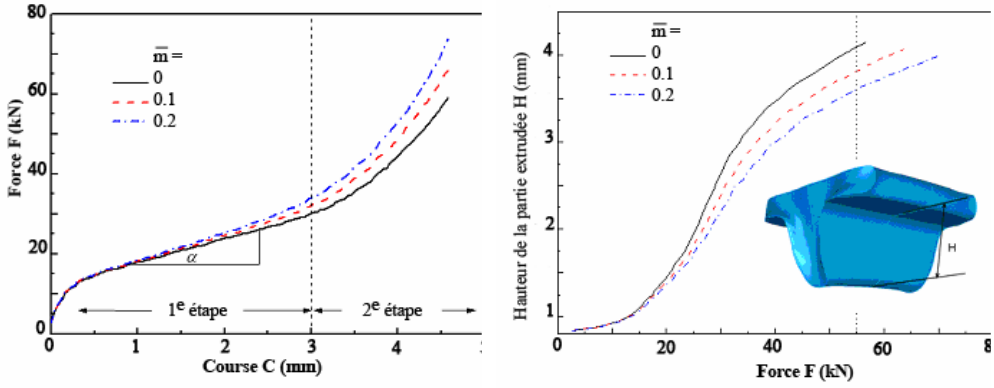


Fig. 5 Influence du frottement sur la courbe force F-course C et la hauteur H de la partie extrudée
Influence of friction on the force F-stroke C curve and the height H of the extruded part

Les courbes d'évolution de la force F avec la course C pour diverses valeurs du coefficient de frottement sont données sur la figure 5. Comme prévu, la force augmente

avec le frottement et la sensibilité de F au frottement augmente avec la course dans le stade terminal où le produit devient de plus en plus plat. Considérons la pente de ces courbes :

$$k = dF / dC \quad (1{,}4 \le C \le 2{,}8\ mm) \tag{2}$$

Cette pente augmente avec le frottement, mais est indépendante de la course. Elle permet d'évaluer le frottement dans le premier stade, car la mesure précise de la course pour une force mesurée est expérimentalement difficile. Un autre avantage de la pente k est que cette grandeur évolue linéairement avec le coefficient de frottement (figure 7).

La hauteur de la partie extrudée du produit H est mesurée à partir de la surface plane en contact avec la matrice au centre de la pièce (figure 5). La hauteur H augmente avec la force, à frottement donné, et, à force donnée, diminue quand le frottement augmente. Par exemple, quand la force vaut F = 55 kN, la hauteur H atteint 4,1 mm pour un frottement nul, mais tombe à 3,6 mm quand $\overline{m} = 0{,}2$.

Afin de définir la géométrie de la rainure et du lopin assurant la meilleure sensibilité de l'essai au frottement, nous avons simulé l'opération réalisée dans diverses conditions géométriques en donnant à $\overline{m}$ les valeurs 0, 0,1 et 0,2. Nous considérons l'effet sur la pente k et la hauteur finale extrudée H.

Paramètres fixes	Paramètres variables	Sensibilité maximale
β = 20° ; R = 1 mm ; d = 10 mm	L = 4 - 7 - 14 mm	Aucun effet
L = 7 mm ; β = 20° ; d = 10 mm	R = 1 – 2 – 3 mm	R = 1 mm
L = 7 mm ; R = 1 mm ; d = 10 mm	β = 15 – 30 - 90°	β = 15°

Tab. 1 Etude paramétrique de la sensibilité de l'essai au frottement ($\overline{m}$ =0 - 0,1 - 0,2 ;D = 7 mm)
Parametric study of the sensitivity of the friction test ($\overline{m}$ = 0 – 0.1 – 0.2 ; D = 7 mm)

Le tableau 1 précise les diverses conditions étudiées et les résultats obtenus qui sont détaillés en [18]. Commentons simplement les principaux effets observés :

- *La force est, en première approximation, proportionnelle à la longueur L de l'éprouvette ; de ce fait, la sensibilité de la pente ou de H au frottement est pratiquement indépendante de L.*
- *L'effet du frottement sur k et H est maximal pour le plus petit rayon de raccordement R.*
- *La sensibilité au frottement de k et H* est maximale pour l'angle β minimal.

Enfin, on a vérifié que les résultats obtenus avec ce code de calcul sont très voisins de ceux obtenus avec un autre code de calculs par éléments finis, le code ABAQUS [20].

4. ETUDE EXPERIMENTALE

Conditions expérimentales

Conditions	Lubrifiant
Lubrication solide	Film résiduel de phosphate de zinc et de savon
Huile	Sinol draw 891 (viscosité à 20°C : 0,23 Pa.s)
Film solide + huile	Film de phosphate de zinc et savon + Sinol draw 891

Tab. 2 Conditions de lubrification étudiées
Lubrication conditions

On teste la barre d'acier doux phosphatée-savonnée et étirée de diamètre D = 6.85 mm dont la rhéologie est fournie sur la figure 3a. Les éprouvettes, découpées dans

la barre ont une longueur L = 7 mm. Trois conditions de lubrification sont étudiées (tableau 2) :

- La lubrification assurée par le film résiduel de phosphate de zinc et de savon.
- La lubrification assurée par une huile sur le métal nu, la couche solide résiduelle ayant été au préalable éliminée par un décapage électrolytique.
- Une lubrification « mixte », par addition d'huile, l'éprouvette conservant sa couche résiduelle de phosphate de zinc et de savon.

Les outils ont été réalisés sous forme d'inserts en carbure de tungstène lié cobalt et frettés dans un anneau en acier. La forme de la rainure est celle de la figure 3b. Les essais sont réalisés à une vitesse d'écrasement égale à 0,1 mm/s et la course maximale est égale à 4,5 mm. On a vérifié au préalable, en réalisant des essais à des courses croissantes, que l'extraction des éprouvettes de la matrice se fait sans difficulté. La figure 6 montre les outils et les éprouvettes déformées. On a effectué trois essais par condition de lubrification.

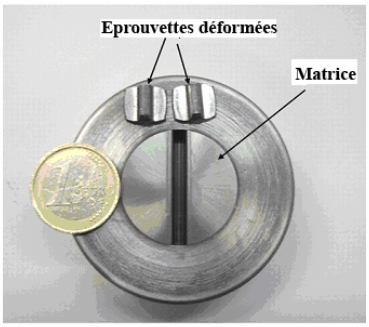


Fig. 6 Vue de la matrice et des éprouvettes déformées (la pièce de 1 € donne l'échelle)
View of the V-grooved die and deformed samples (the 1 € coin provides the scale)

La simulation numérique de l'opération avec cette géométrie de matrice et d'éprouvette avec un frottement de Tresca ou de Coulomb montre que la pente k (exprimée en kN/mm), dans le premier stade de l'essai peut être décrite avec une très bonne approximation par les relations linéaires suivantes (figure 7) :

$$k = 5{,}7 + 6{,}8\overline{m} \quad ou \quad k = 5{,}8 + 15{,}2\mu \quad \left(1{,}4 \le C \le 2{,}8\ mm\right) \tag{3}$$

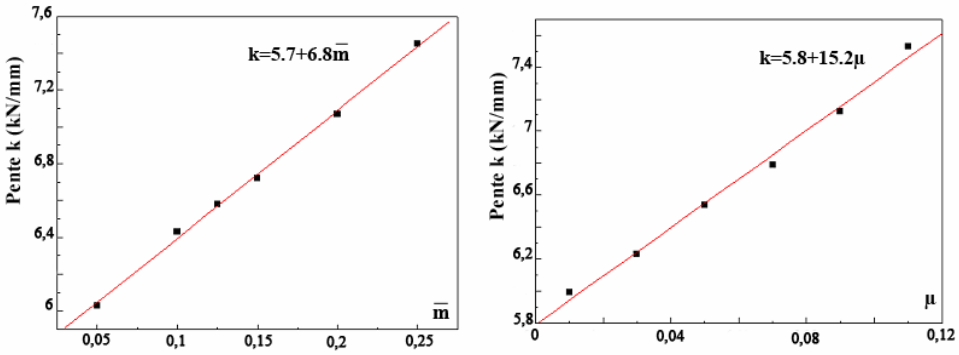


Fig. 7 Effet des coefficients de frottement $\overline{m}$ et μ sur la pente k (1,4 ≤ C ≤ 2,8 mm)
Influence of the friction coefficients $\overline{m}$ and μ on the slope k (1.4 ≤ C ≤ 2.8 mm)

Résultats expérimentaux

La figure 8 donne les courbes force-course pour les trois conditions de lubrification. On note les points suivants :

- Les courbes ont bien l'allure prévue par la théorie (figure 5)
- La force est maximale pour la lubrification à l'huile seule, minimale pour la lubrification mixte, mais la force imposée par la lubrification mixte est très voisine de celle imposée par la lubrification solide.

L'effet lubrifiant de l'huile seule est sans doute limité par son éjection du contact lors du forgeage. Un effet plus important pourrait sans doute être observé avec une huile plus visqueuse et/ou une vitesse d'écrasement plus élevée [3]. Par contre, comme prévu, le film solide réduit fortement le frottement. De ce fait, l'addition d'huile ne modifie que faiblement le frottement.

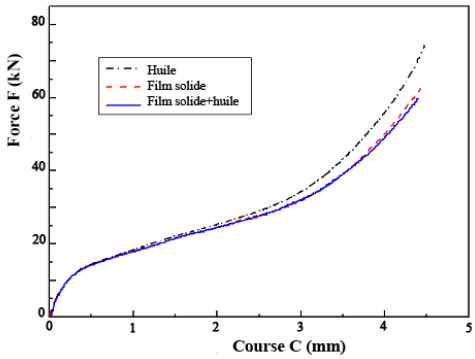


Fig. 8 Les courbes force F-course C pour les trois conditions de lubrification
The force F-stroke C curves for the three conditions of lubrication

A partir des pentes de ces courbes pour les courses comprises entre 1,4 mm et 2,8 mm, on a déduit des relations (3) les valeurs des coefficients de frottement de Tresca et de Coulomb pour les trois conditions de lubrification (figure 9). Le coefficient de frottement avec huile seule est double de celui assuré par le film solide dont les valeurs sont en bon accord avec celles de la littérature [1]. L'addition d'huile au film solide diminue d'environ 20 % le frottement.

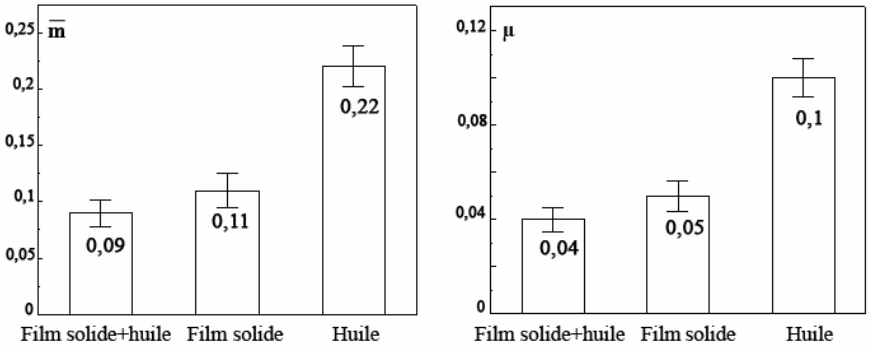


Fig. 9 Coefficients de frottement déduits de la pente k de la courbe force-course (1,4 ≤ C ≤ 2,8 mm)
Friction coefficents deduced from the force-stroke curve slope k (1.4 ≤C ≤ 2.8 mm)

La hauteur H_f de la partie extrudée à la course maximale de 4,5 mm a été mesurée dans le plan médian après découpe de l'éprouvette. La figure 10 représente les couples de valeurs expérimentales (F_f, H_f) et les courbes d'évolution théorique de H avec F pour diverses valeurs du coefficient de frottement de Tresca. On en déduit qu'en moyenne l'huile assure un coefficient de frottement $\overline{m} \sim 0{,}22$, le film solide $\overline{m} \sim 0{,}10$ et le film solide additionné d'huile $\overline{m} \sim 0{,}09$, valeurs en très bon accord avec celles déduites de la pente d'évolution de la force (figure 9). Ceci démontre en outre que le coefficient de frottement est sensiblement constant lorsque la course varie de 1,4 à 4,5 mm.

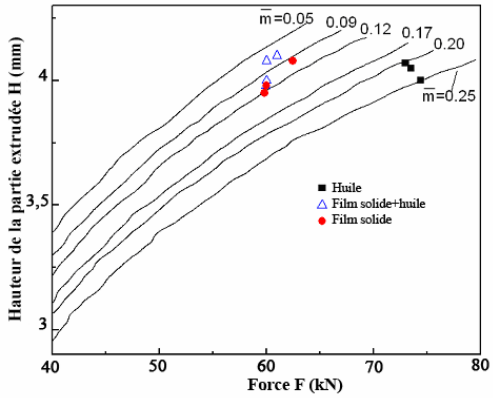


Fig. 10 Valeurs théoriques et expérimentales (C = 4,5 mm) du couple hauteur extrudée H- force F
Theoretical and experimental (C = 4,5 mm) values of the couple extruded heigth H- force F

Enfin, la simulation numérique de l'essai pour les trois valeurs du coefficient de frottement de Tresca ainsi mesurées fournit des courbes force-course en très bon accord avec les courbes expérimentales [18]. Ces derniers résultats confirment l'estimation des valeurs du coefficient de frottement et leur stabilité lors de l'essai.

5. CONCLUSIONS

Nous proposons un nouvel essai de frottement pour la forge à froid, l'essai de forgeage en T. Cette étude théorique et expérimentale permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'essai permet d'estimer le frottement dans des conditions sévères de contact outil/ surface latérale d'un cylindre : pression de contact, déformation et extension de surface élevées, car la force et la géométrie du produit sont sensibles au frottement.
- Deux grandeurs ont été retenues pour estimer le frottement : la pente de la courbe force-course dans le premier stade d'évolution linéaire de la force et le couple de valeurs (force, hauteur extrudée) à la course maximale.
- Une étude paramétrique a permis de définir la géométrie de matrice maximisant la sensibilité de l'essai au frottement.
- Les résultats expérimentaux sont en très bon accord avec les résultats théoriques. Conformément à la pratique industrielle, le film solide résiduel phosphate de zinc/savon est nettement plus performant qu'une huile moyennement visqueuse. L'addition d'huile au film solide réduit de 20 % environ le frottement.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le projet européen VIF (Virtual Intelligent Forging- CA) pour le financement de cette recherche sur le frottement en forgeage à froid. Nous remercions également toutes les personnes du CEMEF pour leur aide et leur travail, spécialement le Dr

P. Montmitonnet pour son intérêt pour ce travail et ses conseils et suggestions judicieux et très utiles, M. G. Fiorucci pour la réalisation des essais de forgeage et M. B. Triger pour l'examen des éprouvettes après essai.

7. RÉFÉRENCES

[1] Bay N., « The state of the art in cold forging lubrication ». *J. Mater. Process. Technol.,* 46 (1994) 19-40.

[2] Altan T., Ngaile G., Shen, G. S., *Cold and hot forging: fundamentals and applications*. ASM International Press, 2004.

[3] Felder E., « Lubrification en mise en forme », Articles BM 7530-7533 (60 p.) *Techniques de l'Ingénieur*, Paris, 2007.

[4] Dubois A., Lazzarotto L., Dubar L., Oudin J.. « A multi-step lubricant evaluation strategy for wire drawing–extrusion–cold heading sequence », *Wear,* 249 (2002) 951–961.

[5] Hu Z. M., Dean T. A., « A study of surface topography, friction and lubricants in metal forming ». *Int. J. Mach. Tools Manuf.,* 40 (2000) 1637–1649.

[6] Lazzarotto L., Dubois A., Dubar L., Verleene A., Oudin J., « Testing of a zinc phosphate stearate coating according to true conditions of contact in wire drawing », *Surf. Eng.,* 14 (1998) 335–338.

[7] Chenot J. L., Fourment L., Ducloux R., Wey E., Ravassard P., « Développement du logiciel FORGE3® en collaboration avec l'industrie », *Congrès Français de Mécanique*, UTT, Troyes, France, Septembre 2005, 12 p.

[8] Zhang Q., Arentof M., Bruschi S., Dubar L., Felder E.. « Measurement of friction in a cold extrusion operation: Study by numerical simulation of four friction tests ». Proc 11th *ESAFORM Conference on Material Forming*. INSA Lyon, France, 2008, 4 p.

[9] Male A. T., Cockcroft M. G., « A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation », *J. Inst. Metals*, 93 (1964) 38-45.

[10] Barcellona A., Cannizzaro L., Forcellese A., Gabrielli F., « Validation of frictional studies by double-cup extrusion tests in cold-forming », *Annals of the CIRP*, 45 (1996) 211-214.

[11] Gouveia B. P. P. A., Rodrigues J. M. C., Bay N., Martins P. A. F., « Finite-element modelling of cold forward extrusion ». *J. Mater. Process. Technol.*, 94 (1999) 85-93.

[12] Wagener H. W., Wolf J., « Coefficient of friction in cold extrusion », *J. Mater. Process. Technol.*, 44 (1994) 283-291.

[13] Arentoft M., Vigso, C., Lindegren M., Bay N., « A study of the double cup extrusion process as a friction test », Proc. of *Advanced Technology of Plasticity*, Stuttgart, 5th ICTP, Lange K. (Ed.) vol. I (1996) 243–250.

[14] Schrader T., Shirgaokar M., Altan T., « A critical evaluation of the double cup extrusion test for selection of cold forging lubricants. *J. Mater. Process. Technol.,* 189 (2007) 36-44.

[15] Bucaille J. L., Felder E., Hochstetter G., « Mechanical analysis of the scratch test on elastic and perfectly plastic materials with the three-dimensional finite element modelling », *Wear*, 249 (2001) 422–432.

[16] Isogawa S., Kimura A., Tozawa Y., « Proposal of an evaluating method on lubrication », *Annals of the CIRP*, 41 (1992) 263-266.

[17] Xu W. L., Rao K. P., « Analysis of the deformation characteristics of spike-forging process through FE simulations and experiments », *J. Mater. Process. Technol.*, 70 (1997) 122- 128.

[18] Zhang Q., « Evaluation of friction conditions in cold forging », WP3 Report, Virtual Intelligent Forging (VIF)-CA, (June 2008).

[19] Computer codes FORGE: http://www.transvalor.com

[20] ABAQUS (2003) User's manual for version 6.4, Hibbitt, Karlson & Sorensen Inc..