

Caractérisation de la tribologie des procédés de mise en forme à haute température

A. DUBOIS^a, M. DUBAR^a, L. DUBAR^a

a.LAMIH UMR CNRS 8201, Université de Valenciennes et du Hainaut
Cambrésis, andre.dubois@univ-valenciennes.fr

mirentxu.dubar@univ-valenciennes.fr

laurent.dubar @univ-valenciennes.fr

Résumé :

Les procédés de mises en forme à chaud sont fortement sensibles aux conditions de contact et de frottement. La connaissance de ces conditions de frottement est rendue difficile à cause des températures extrêmes rencontrées dans ce type de procédés (supérieures à 1000°C lors de la mise en forme des aciers). Ce papier présente le banc d'essais tribologiques développé au LAMIH afin de répondre à cette problématique. Le banc d'essais a été conçu de façon à reproduire une large gamme de pressions de contact, de vitesses de glissement et de températures. Dans un premier temps, la méthodologie utilisée afin de simuler des conditions de contact respectueuses de celles rencontrées sur site industrielle est développée. Ensuite, trois campagnes d'essais distinctes sont présentées. La première campagne étudie les effets de la composition des lubrifiants à base de graphite sur les conditions de frottement en forgeage à chaud. Ces premiers résultats montrent que le banc d'essai est suffisamment sensible pour distinguer les propriétés de deux lubrifiants a priori identiques. La deuxième campagne quantifie l'aptitude de deux lubrifiants blancs à réduire le frottement et protéger la surface de l'outil. Le premier lubrifiant blanc est à base de sel minéral, le second à base de sel organique. Les essais sont effectués à 1200 °C sur des échantillons d'acier AISI 4820, avec des frotteurs en acier nitruré AISI H11. Les résultats montrent que les lubrifiants blancs testés conduisent à des coefficients de frottement comparables à ceux mesurés pour les lubrifiants à base de graphite. Toutefois, dans les conditions testées, les lubrifiants blancs perdent leur capacité à réduire le frottement quatre fois plus rapidement que les lubrifiants à base de graphite. La dernière campagne est menée pour qualifier un nouveau revêtement sol-gel déposé sur à outil en acier AISI H13. Les essais sont effectués à 1100 ° C sur des échantillons d'acier AISI 4820. Après chaque essai, les capacités du revêtement à réduire le frottement et à empêcher le transfert de métal des éprouvettes vers l'outil revêtues sont établies. Les résultats montrent que les revêtements sol-gel testés réduisent le frottement et possèdent une bonne aptitude à retarder les transferts de matière, mais imposent des conditions de dépôt qui peuvent nuire à la tenue mécanique de l'outil (chute de la dureté).

Abstract:

Identification of friction data at high temperatures is still a critical point in the optimization of forming processes. The present paper presents the Warm and Hot Upsetting Sliding Test (WHUST): a test bench dedicated to the tribology of metal forming processes at high temperature. The friction test operates according to a large range of plastic strains, contact pressures and temperatures. The paper presents the methodology developed in order to simulate on the test bench contact conditions encountered at the tool/workpiece interface of various industrial forming processes. Three designs of experiments are discussed. The first one studies the effects of the composition of graphite based lubricants on friction of hot forging tool. A particular attention is paid on the volume of lubricant used, the size of graphite particles and the amount of binding agents. The second set of experiments quantifies the ability of two white lubricants to reduce friction and to protect tool surface. The first lubricant is a mineral salt; the second one is an organic salt. Tests are performed at 1200°C on AISI 4820 steel specimens, with AISI H11 nitrided steel contactors. Results show that the tested white lubricants lead to coefficient of friction similar to those obtained with graphite lubricants. Nonetheless white lubricants lose their ability to reduce friction as soon as the sliding length becomes greater than 10 mm, while graphite lubricants can undergo 30mm. The last design of experiments is performed to qualify a new sol-gel coating deposited on a common tool steel AISI H13. Tests are operated at 1100°C on AISI 4820 steel specimens. Results show that the sol-gel coatings improve tool friction performances but the coating process may reduce tool hardness.

Mots clefs : tribologie, forgeage à chaud, graphite, lubrifiant blanc, sol-gel

1 Introduction (16 gras)

Les lubrifiants utilisés en mise en forme à chaud des métaux doivent satisfaire de nombreuses exigences. S'ils doivent réduire les frottements de façon à minimiser l'énergie mécanique nécessaire à la fabrication des pièces, ils doivent surtout protéger les surfaces en contact contre les phénomènes d'abrasion et d'adhésion afin d'assurer une production de pièces de qualité. Ils sont également tenus d'assurer le refroidissement de la surface des outils afin de maintenir une durée de vie acceptable à ces derniers [1]. Des impératifs environnementaux s'ajoutent à ces contraintes mécaniques : les lubrifiants doivent être « propres » et non polluants [2]. Ceci a conduit les fabricants de lubrifiants à proposer des nombreuses familles de produits : lubrifiants liquides à base aqueuse ou huileuse, lubrifiants solides à base de savons, de phosphate ou de sels. Même si les compositions chimiques des lubrifiants peuvent être totalement différentes, la plupart d'entre eux associent trois éléments chimiques principaux : un agent lubrifiant qui réduit le frottement et protège les surfaces, un liant qui assure l'adhésion du lubrifiant aux surfaces et permet au lubrifiant de supporter de grandes déformations et, enfin, un convoyeur qui assure le transport de l'agent lubrifiant jusqu'aux zones à lubrifier [2]. D'un autre côté, la tribologie de la mise en forme des métaux est complexe : le frottement entre les outils et les pièces dépend de nombreux paramètres [3-4] :

- les paramètres mécaniques telles que la pression de contact, la déformation plastique, la vitesse de glissement, etc.,
- les paramètres physiques comme la rugosité, la température (côté pièce et outil), l'épaisseur du film lubrifiant, la dureté des matériaux, etc.,
- les paramètres chimiques qui incluent notamment l'énergie de surface, la présence d'oxydes, les affinités chimiques entre le lubrifiant et les surfaces métalliques en contact.

Le choix d'un lubrifiant est encore un point crucial dans le développement ou l'optimisation d'un procédé de mise en forme. Un lubrifiant non approprié, ou un bon lubrifiant utilisé de la mauvaise façon, peuvent conduire à une usure prématurée des outils de mise en forme, à des défauts de surface des pièces fabriquées et, en conséquence, générer des surcoûts de production important. Pour un procédé de mise en forme donné, la difficulté de choisir la bonne lubrification tient autant au grand nombre de lubrifiants existants sur le marché qu'à la difficulté de tester ces produits dans des conditions réelles d'utilisation.

Les travaux présentés se proposent d'accroître la compréhension de la tribologie des procédés de mise en forme des métaux via l'utilisation d'un banc de frottement spécifiquement conçu pour reproduire les conditions de contact en forgeage à chaud. En premier lieu le banc d'essai, ses réglages et les méthodologies de d'analyse de ses résultats sont présentés. Ensuite trois cas d'études sont présentés et discutés : influence de la composition des lubrifiants aqueux graphités, comparaison des performances de deux lubrifiants « blancs », développement d'un revêtement sol-gel pour la protection des outils de forge à chaud.

2 Le Warm and Hot Upsetting-Sliding Test (WHUST)

2.1 Principe de fonctionnement du banc d'essai

Le WHUST est un dispositif d'essai conçu pour reproduire en laboratoire les conditions de contact et de frottement rencontrées en forgeage à chaud. Le WHUST met en jeu un frotteur qui joue le rôle de l'outil et une éprouvette qui représente la pièce à mettre en forme. L'éprouvette peut avoir des formes très variées mais doit posséder une génératrice le long de laquelle le contact va avoir lieu. Lors d'un essai sur le WHUST, le frotteur pénètre légèrement dans l'éprouvette puis glisse le long d'une des génératrices en maintenant la pénétration constante [5]. Il génère ainsi une déformation plastique en proche surface de l'éprouvette sur une distance de glissement de plusieurs centimètres. Les paramètres du banc sont la forme du frotteur, sa pénétration dans l'éprouvette, sa vitesse de glissement, sa température et la température de l'éprouvette (Figure 1).

2.2 Réglages du WHUST

Le WHUST a été conçu pour simuler les conditions de contact rencontrées aux interfaces pièces/outils des procédés de mise en forme à chaud des métaux. Le principe général d'utilisation du banc d'essai est présenté en figure 2. Dans un premier temps une analyse mécanique du procédé étudié est réalisée afin d'identifier les pressions de contact, vitesses de glissement, déformations plastiques et températures que devra reproduire le banc d'essai. Des simulations numériques du banc d'essai sont

alors menées afin de déterminer la forme optimale du frotteur, sa pénétration et sa vitesse de déplacement pour reproduire ces grandeurs cibles. Ceci permet de garantir que le banc d'essai reproduit les bonnes conditions de contact mécanique. Les frotteurs et les éprouvettes sont usinés dans des outils et des pièces industriels, en prenant soin de ne pas affecter les surfaces utiles lors des usinages. Les surfaces en contact sur le WHUST sont donc similaires à celles rencontrées sur le procédé. Elles possèdent en conséquence les mêmes caractéristiques physiques et chimiques (rugosité, oxydation, etc.).

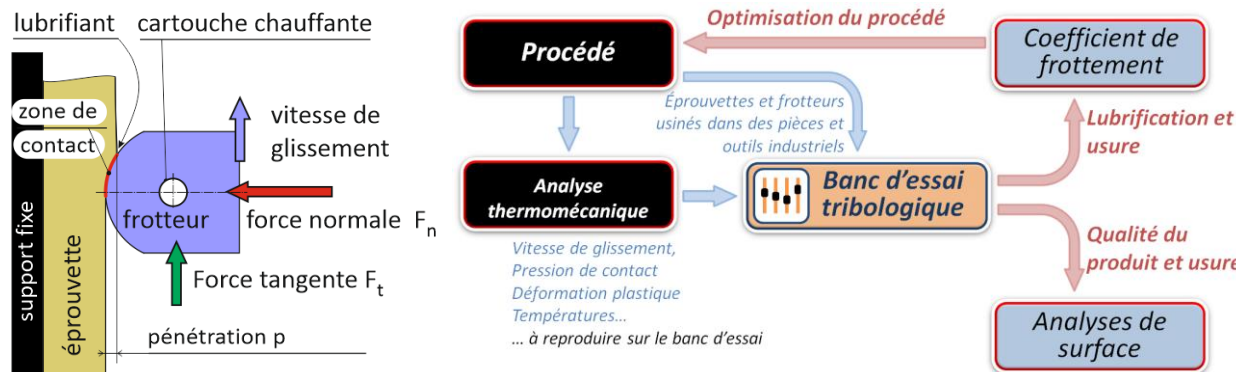


Figure 1 : schéma en coupe du banc d'essai WHUST. Figure 2 : principe de réglage et d'utilisation du WHUST d'essai WHUST.

2.3 Résultats du WHUST

Les résultats bruts fournis par le banc d'essai sont les forces normales et tangentes au contact et les analyses de surface réalisées sur les frotteurs et sur les éprouvettes (MEB-EDS, profilométrie 3D). Ces résultats bruts sont exploités et exprimés sous la forme « d'indicateurs de performance ». Ces indicateurs permettent de qualifier et quantifier la capacité d'un lubrifiant à réduire le frottement et protéger les surfaces en contact. Les indicateurs utilisés dans le présent article sont le coefficient de frottement de Coulomb μ , la longueur critique de glissement avant apparition des premiers défauts de surface L_c , l'analyse de dépôts de matière sur la surface des frotteurs (début d'usure adhésive) [6].

3 Cas d'étude : forgeage à chaud d'un tripode

De façon à tester les lubrifiants dans des conditions de contact réalistes, les paramètres de réglage du WHUST sont réglés de façon à simuler le forgeage à chaud d'un tripode en acier 20MnCr5 à l'aide d'outils en acier X38CrMoV-5 nitrurés (Figure 3). L'étude se concentre sur le contact le long des flancs de la matrice, endroit où les pressions de contact sont modérées mais où les distances de glissement peuvent être importantes et générer de l'usure abrasive [7]. Des mesures sur sites montrent que la température de la pièce avant essai est de 1100°C, la température de l'outil est de 200°C et la pièce présente une couche de calamine de 18 à 20 μm d'épaisseur. Les simulations numériques

montrent que les pressions de contact sont voisines de 160 MPa et la vitesse de glissement 60 mm.s⁻¹. Les paramètres de réglage du WHUST sont ajustés pour reproduire ces grandeurs.

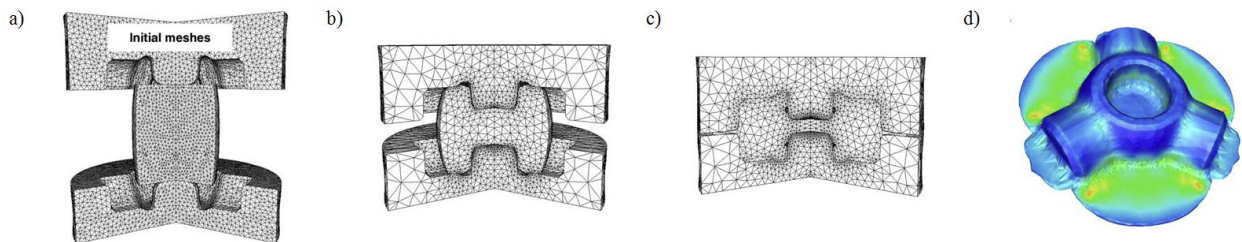


Figure 3. Exemple de mise en forgeage de tripode d'après [7].(a), (b), (c) Maillages éléments finis du procédé, (d) forme finale du tripode.

3 Résultats

3.1 Campagne 1 : dispersion de graphite dans l'eau

Les lubrifiants graphités utilisés en mise en forme sont souvent composés de grains de graphite en suspension dans un liquide (eau ou huile). La suspension est pulvérisée sur la surface chaude des outils. Le liquide s'évapore et laisse une fine couche homogène de graphite sur l'outil. Le liquide assure un triple rôle dans la lubrification : il est le convoyeur qui transporte l'agent lubrifiant jusqu'aux zones à lubrifier, il refroidit la surface des outils et il contamine le graphite par de la vapeur, ce qui confère à ce dernier ses excellentes propriétés lubrifiantes [9]. Les suspensions de graphite dans l'eau sont généralement composées de 95% d'eau et de 5% de grains de graphite. La taille de ces grains varie de 10 à 40 μm . Des agents liants, tels ue les composés Na-Si, sont également ajoutés à la suspension pour renforcer l'adhérence des couches de graphites sur la surface des outils.

La première campagne d'essais réalisée sur le WHUST teste différentes suspensions de graphite dans l'eau. Les résultats en termes de réduction du frottement et de protection des surfaces sont présentés dans le tableau 1. La longueur critique L_c est la distance de glissement à partir de laquelle les premières rayures sont observées à la surface de l'éprouvette. Plus L_c est faible, plus le pouvoir de protection des surfaces du lubrifiant est faible. Les éprouvettes mesurant 40mm de long, une longueur L_c de 40 mm signifie qu'aucune rayure n'a été observée durant l'essai.

Tableau 1. Evolution du coefficient de frottement μ et de la distance de glissement critique L_c pour différentes configuration de lubrification à base de graphite

	Epaisseur de film lubrifiant (grain=moyen, agent de liaison =28%)				taille de grain de graphite (épaisseur=30 μm , agent de liaison =28%)		
	0 μm	10 μm	30 μm	40 μm	petit	moyen	grand
Coef de frottement μ	0,65 ^{±0.06}	0,46 ^{±0.04}	0,28 ^{±0.03}	0,16 ^{±0.01}	0,20 ^{±0.03}	0,28 ^{±0.03}	0,36 ^{±0.02}
Longueur critique L_c	18 ^{±1.4}	33 ^{±1.6}	40 ^{±0.0}	40 ^{±0.0}	40 ^{±0.0}	40 ^{±0.0}	36 ^{±1.6}

Les résultats montrent que la couche de graphite déposée sur l'outil doit être supérieure ou égale à 30 μm . Pour des épaisseurs plus faible, le graphite est rapidement consommé lors du glissement, les premières rayures apparaissent ($L_c < 40\text{mm}$) et le coefficient de frottement augmente. La taille des particules de graphite joue en rôle dans la structure du dépôt de graphite après évaporation de l'eau. Des grains de graphite trop gros conduisent à un dépôt hétérogène : des zones de la surface du frotteur ne sont pas protégées, des contacts directs métal/métal apparaissent donnant naissance aux premières rayures et à une augmentation du coefficient de frottement (Figure 4).

3.2 Campagne 2 : comparaison de deux lubrifiants blancs

Si le graphite est largement utilisé dans l'industrie de la forge, les vapeurs résultant l'évaporation de la partie liquide du lubrifiant conduisent à des espaces de travail sales, des fuites dans le sol et les nappes phréatiques. Les fabricants de lubrifiant ont ainsi développés de nouveaux produits pour réduire le frottement de façon propre. Ces lubrifiants sont appelés « lubrifiants blancs » car ils sont dépourvus de graphite. Les principales familles de lubrifiants blancs sont à base de polymères, de carbone, de dépôts salins [2].

Deux lubrifiants blancs commercialisés ont été testés. Le premier est un sel minéral à base de sodium (WL1) et le second est une émulsion d'huile dans l'eau contenant du silicium (WL2). Au début des essais, les deux lubrifiants conduisent à un coefficient de frottement de 0,2 avec une dispersion de $\pm 0,02$. Toutefois, après une distance de glissement de 10 mm, les coefficients de frottement augmentent rapidement jusqu'à 0,5. Les dispersions augmentent également, notamment pour le lubrifiant WL2 dont le coefficient de frottement varie entre 0,4 et 0,7 après 25 mm de glissement (figure 5). A titre de comparaison, les lubrifiants graphités de la campagne d'essai 1 conduisent à un coefficient de frottement moyen qui augmente de 0,14 à 0,33, avec une dispersion de 0,02. Les analyses EDS montrent qu'aucune trace de sodium (WL1) ou de silicium (WL2) ne demeure sur les frotteurs après essai. Ainsi les deux lubrifiants blancs testés donnent des résultats en termes de réduction du frottement proches d'un lubrifiant graphité, mais uniquement pour de faibles distances de glissement. Pour des applications avec des distances de glissement plus importantes, de nouvelles formulations de lubrifiant, avec des agents de liaison plus forts ou avec épaisseurs de dépôt plus importantes, seraient nécessaires pour garantir l'intégrité des surfaces.

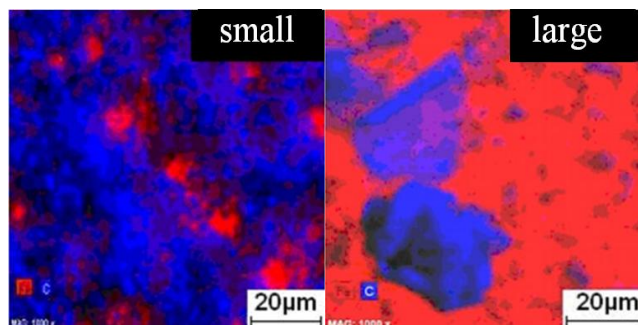


Figure 4. Analyse EDS de la surface d'un frotteur avant essai. A gauche : petit grain, à droite : gros grain.

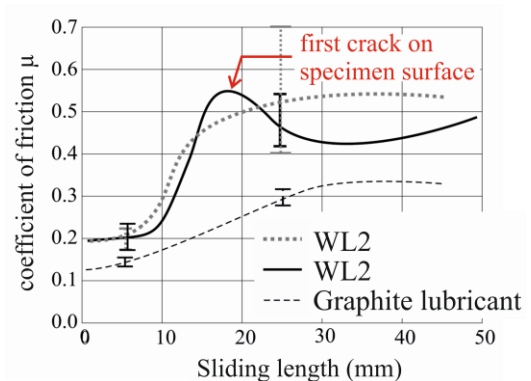


Fig. 5. Coefficient de frottement en fonction de la longueur de glissement pour deux lubrifiants blancs.

3.3 Campagne 3 : développement d'un revêtement sol-gel pour la protection des outils

Le procédé sol-gel est une voie de progrès prometteuse pour le développement de revêtements de surface [10,11]. Ainsi un revêtement sol-gel a déjà développé pour accroître la résistance à la corrosion d'un acier chauffé à 1000°C [12].

Dans la présente étude, un revêtement sol-gel d'alumine a été préparé par la gélification contrôlée d'aluminium tri-sec-butanolate dans un solvant à base d'alcool. Le revêtement a été dopé avec de l'alumine α , choisie pour sa dureté importante [13], et du nitrure de bore hexagonal hBN, choisi pour sa capacité à réduire le frottement [14]. Les essais ont été réalisés sur le WHUST avec les mêmes réglages que pour les campagnes d'essais précédentes : pression de contact de 160 MPa, vitesse de glissement de 60 mm.s⁻¹, température d'éprouvette de 1100°C et de frotteur de 200°C. Les frotteurs étaient revêtus d'un dépôt sol-gel d'une épaisseur moyenne comprise entre 0,2 et 0,3 μm . Aucun lubrifiant n'a été utilisé.

La figure 6 montre la surface des frotteurs après essais. La zone de contact du frotteur non revêtu présente de nombreux dépôts de matière arrachés aux éprouvettes alors que les frotteurs revêtus sont quasiment dépourvus de dépôt. L'effet du nitrure de bore montre ici son efficacité en limitant le frottement et retardant les phénomènes d'usure adhésive. Ce résultat se retrouve au niveau du coefficient de frottement : 0,7 pour les essais réalisés sans lubrifiant ni revêtement, 0,4 pour les essais sans lubrifiant mais avec dépôt sol-gel. Les résultats obtenus sont donc prometteurs avec une bonne protection des surfaces. Toutefois le coefficient de frottement obtenu avec le revêtement sol-gel reste élevé et empêche l'utilisation du dépôt comme moyen de substitution aux lubrifiants actuels.

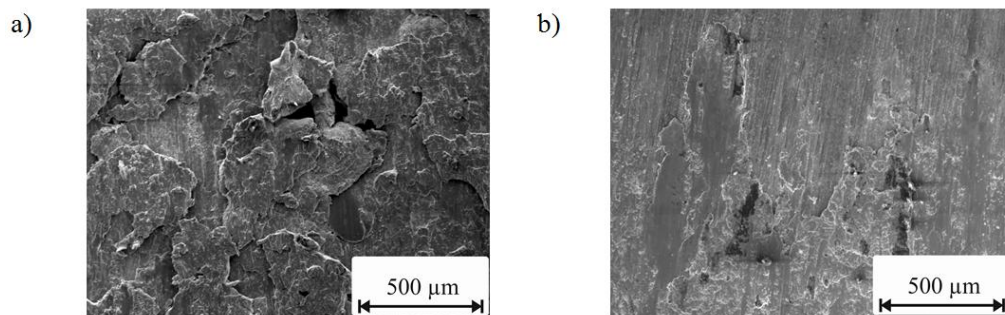


Figure 6 : micrographie des surfaces du frotteur après essai. (a) frotteur non revêtu, (b) frotteur avec revêtement sol-gel.

3 Conclusions

Le banc d'essai Warm and Hot Upsetting Sliding Test a été conçu pour reproduire en laboratoire les conditions de contact et de frottement rencontrés dans les procédés de mise en forme des métaux à haute température. Le banc d'essai fournit des résultats variés, tels qu'un coefficient de frottement, une longueur avant apparition de défaut de surface, des analyses par sonde EDS, qui permettent d'établir les capacités d'un lubrifiant à réduire le frottement et protéger les surfaces de contact. Les

campagnes d'essais présentées montrent que le banc d'essai est suffisamment sensible pour distinguer les performances de deux lubrifiants a priori identiques (lubrifiants graphités dont seule la taille de grain ou la teneur en liant sont modifiées).

Il a été montré que :

- la taille de grain de graphite ainsi que le teneur en agent liant d'une solution de graphite dans l'eau joue directement sur les performances du lubrifiant ;
- les lubrifiants blancs commerciaux testés dans cette étude peuvent être de bons substituts lubrifiants graphités tant que les longueurs de glissement restent faibles (inférieures à 10 mm pour une épaisseur de lubrifiant de 30 μm) ;
- les revêtements sol-gel sont une voie de progrès intéressante pour accroître la durée de vie des outils de forgeage à chaud en retardant l'apparition de l'usure adhésive. Toutefois ces développements ne peuvent pas se substituer à la lubrification.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Institut Carnot ARTS, la Fédération de Recherche CNRS Transports Terrestres et Mobilité, les projets CISIT et ELSAT2020 supportés par la Communauté Européenne, le ministère de l'Education National et de la Recherche, le conseil Régional des Hauts de France sans qui ces travaux n'auraient pu aboutir.

Références

- [1] JASchey, Tribology in Metal Working, Lubrication and Wear. ASM, Ohio, 1983
- [2] N Bay, A Azushima, P Groche, I Ishibashi, M Merklein, M Morishita, T Nakamura, S Schmid, M Yoshida, Environmentally benign tribo-systems for metal forming, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 59-2 (2010) 760-780
- [3] J Kihara, Tribological problems relating to physical and chemical interaction among the tool, the workpiece and the lubricant. In: Advanced Technology of Plasticity, vol. 4 (1990) 1693-1702
- [4] L Dubar, C Hubert, P Christiansen, N Bay, A Dubois, Analysis of fluid lubrication mechanisms in metal forming at mesoscopic scale, CIRP Annals-Manufacturing Technology (2012) 271-274
- [5] L Dubar, A Dubois, M Dubar, Friction Analysis in Bulk Metal Forming. In : 60 Excellent Inventions in Metal Forming, Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 23-28
- [6] L Lazzarotto, A Dubois, L Dubar, A Verleene, J Oudin, Testing of zinc phosphate/stearate coating according to true conditions of contact in wire drawing, Surface engineering, vol. 14-4 (1998) 335-338
- [7] E Daouben, A Dubois, M Dubar, L Dubar L., R Deltombe, N Truong Dinh, L Lazzarotto, Effects of lubricant and lubrication parameters on friction during hot steel forging. International Journal of Material Forming, 1 (2008) 1223-1226
- [8] R Boussetta, T Coupeze, L Fourment, Adaptive remeshing based on a posteriori error estimation for forging simulation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (2006) 6626-6645
- [9] AR Lansdown, Lubrication and Lubricant Selection, Professional Engineering Publishing, ISBN 1-86058-408-X, 2004

- [10] B Felde, A Mehner, J Kohlscheen, R Gläbe, F Hoffmann, P Mayr, Deposition of alumina coatings on monocrystalline diamonds by sol-gel techniques, *Diamond and related Materials* (2001) 515-518
- [11] K Bewilogua, G Bräuer, A Dietz, J Gäbler, G Goch, B Karpuschewski, B Szyszka, 2009, Surface technology for automotive engineering, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2009) 608–627
- [12] D Wang, G P Bierwagen, Sol-gel coatings on metals for corrosion protection, *Progress in Organic Coatings* (2009) 327–338
- [13] I Piwonski, K Soliwoda, The effect of ceramic nanoparticles on tribological properties of alumina sol-gel thin coatings, *Ceramics International* (2010) 47-54
- [14] Y Kimura, T Wakabayashi, K Okada, T Wada, H Nishikawa, Boron nitride as a lubricant additive, *Wear* (1999) 199-206