

Quantification de l'usure adhésive en mise en forme à froid d'un alliage Al-Mg-Si

K. Le Mercier^a, M. Dubar^{a,*}, K. Mocellin^b, A. Dubois^a, L. Dubar^a

a. UVHC, LAMIH UMR CNRS 8201, F-59313 Valenciennes, France

b. Mines ParisTech, PSL – Research University, CEMEF – Centre for Material Forming, UMR CNRS 7635, F-06904 Sophia Antipolis, France.

Résumé :

Plusieurs essais de compression-translation sont réalisés à des vitesses de glissement comprises entre 20 et 200 mm.s⁻¹ ainsi qu'à différents taux de déformation plastique pour reproduire les conditions de contact locales à l'interface outil/matière durant la mise en forme à froid d'un alliage d'aluminium 6082. Une approche originale, capable d'évaluer le volume de matière adhérente par le biais d'acquisitions de la topographie des surfaces et des analyses dispersives en énergie est présentée. Le collage est observé quelle que soit la condition d'essai réalisée et deux types de régimes dépendants de la vitesse de glissement sont mis en évidence. Une forte corrélation entre les dépôts de matière relevés et le coefficient de frottement apparaît.

Abstract :

Multiple upsetting-sliding tests are performed at sliding velocities in the range of 20-200 mm.s⁻¹ and at different plastic deformations to reproduce the local contact conditions experienced at the tool/workpiece interface during cold forming of a 6082 aluminium alloy. An original approach, able to evaluate accurately the volume of galled aluminium by means of surface topography acquisitions and energy dispersive spectrometry analyses, is presented. Galling is observed whatever the testing conditions and two types of regimes are underlined according to the sliding velocity. An interesting and strong correlation between the wear volumes and the friction coefficient is also highlighted.

Mots clefs : 6082 aluminium alloy, wear, galling, upsetting sliding test, surface topography

1 Introduction

Le forgeage à froid est un procédé de mise en forme permettant de réaliser des pièces aux formes proches de celles du produit fini avec une cadence de production élevée. La mise en forme du matériau est réalisée à température ambiante. Les pièces produites présentent des états de surface de bonne qualité et des tolérances géométriques précises. Cette qualité de production permet de réduire les coûts en économisant de la matière première et en limitant les étapes de parachèvement du produit [1]. Les propriétés mécaniques des composants ainsi produits sont élevées grâce à l'écrouissage du matériau.

Au cours des dernières années, l'utilisation de composants en alliage d'aluminium formé à froid a augmenté dans de nombreuses applications industrielles et particulièrement dans les applications automobiles et aéronautiques en vue d'alléger les structures. Ces derniers sont réputés pour leur compromis efficace entre leurs caractéristiques mécaniques, leur densité et leur résistance à la corrosion [2]. Cependant, la mise en forme de ces alliages peut être limitée par les phénomènes d'usure adhésive [3]. Le matériau adhère à la surface de l'outil puis il est durci par oxydation, écrouissage ou raffinement de grain durant les différents cycles de mise en forme. La géométrie de l'outil et son état de surface sont alors altérés faisant apparaître des défauts sur les pièces produites. Ces phénomènes d'adhésion peuvent conduire au grippage du système compromettant ainsi la viabilité du procédé de mise en forme. Le plus souvent, les surfaces des outillages sont préparées et un lubrifiant est employé afin de limiter l'apparition de ces phénomènes. L'application de revêtements en carbone adamantin (DLC) sur la surface des outils s'est avérée aussi bénéfique pour à la réduction de l'usure adhésive [4]. Les travaux réalisés par Heinrichs et al. [5,8] permettent une meilleure compréhension des mécanismes de collage impliqués lors de la mise en forme à froid de l'aluminium. Ces derniers ont étudié les mécanismes de transfert de l'aluminium en fonction de la rugosité de la surface de l'outil [5], du type de revêtement [6] et des défauts en surface [7]. Ces études ont révélé que le transfert de l'aluminium ne peut être évité si la lubrification est insuffisante, et ce, quelle que soit la rugosité de surface de l'outillage. Enfin, les travaux de Heinrichs et al. [8] ont souligné l'impact bénéfique des revêtements DLC, sans pour autant supprimer la lubrification, sur la résistance aux mécanismes d'adhésion. D'autres études apportent quelques explications concernant l'évolution de ce mécanisme d'usure suivant la température de mise en forme. Dans le cas de la mise en forme à froid, la quantité d'aluminium transférée augmente principalement avec la distance de glissement et peut-être reliée à la topographie de surface de l'outil [9, 10].

Les travaux présentés dans cette communication sont issus d'une campagne expérimentale conduite dans le but d'analyser les mécanismes de grippage au cours de la mise en forme à froid d'un alliage d'aluminium 6082. Cette investigation repose sur l'essai de compression-translation développé au LAMIH. Ce test permet de reproduire les conditions de contact locales au niveau de l'interface outil/pièce telles que la pression de contact, la vitesse de glissement ou la température interfaciale. Pour évaluer la quantité de matériau adhérente sur la surface des outils, une approche spécifique basée sur la combinaison d'analyses de composition par spectrométrie en énergie et les mesures de topographie par profilométrie optique.

2 Procédure expérimentale

2.1 Essais de compression-translation

Les essais de frottement sont réalisés à l'aide de l'essai de compression-translation, permettant d'étudier les caractéristiques tribologiques des procédés de mise en forme à froid. L'objectif de cet essai est donc de reproduire les conditions de contact locales telles que la pression de contact, la vitesse de glissement et la température à l'interface [11-13].

Avant le début de l'essai, une éprouvette cylindrique (alliage d'aluminium 6082) représentant le lopin mis en forme est fixée dans la partie mobile du montage (Fig.1). Un indenteur jouant le rôle de l'outil (acier X38CrMoV5-3) est fixé perpendiculairement à l'échantillon, sa position est ajustée précisément pour que celui-ci génère une zone de déformation plastique localisée sur la génératrice du lopin au cours de l'essai. Ce dernier se déplace alors avec une vitesse constante pendant que deux cellules d'effort mesurent simultanément les forces normale et tangentielle. Les indenteurs sont en acier à outil

et ont un rayon de 20 mm. Leurs surfaces ont été polies à l'aide d'un papier SiC d'indice 1000. Les éprouvettes sont des lopins de 15 mm de diamètre et 50 mm de long. Pour éviter un contact abrupt avec l'indenteur au début de l'essai, un chanfrein est usiné sur leur partie basse. Une couche de lubrifiant solide en bisulfure de molybdène est appliquée sur la surface des éprouvettes. Les essais sont effectués à température ambiante, à des vitesses de glissement moyennes de 20, 100 et 200 mm.s⁻¹ et à différentes pénétrations recensées dans le tableau ci-dessous. Chaque configuration est réalisée trois fois à température ambiante. Un indenteur est attribué à chacune d'entre elles. Ainsi, la distance de glissement totale endurée par ce dernier est proche de 150 mm.

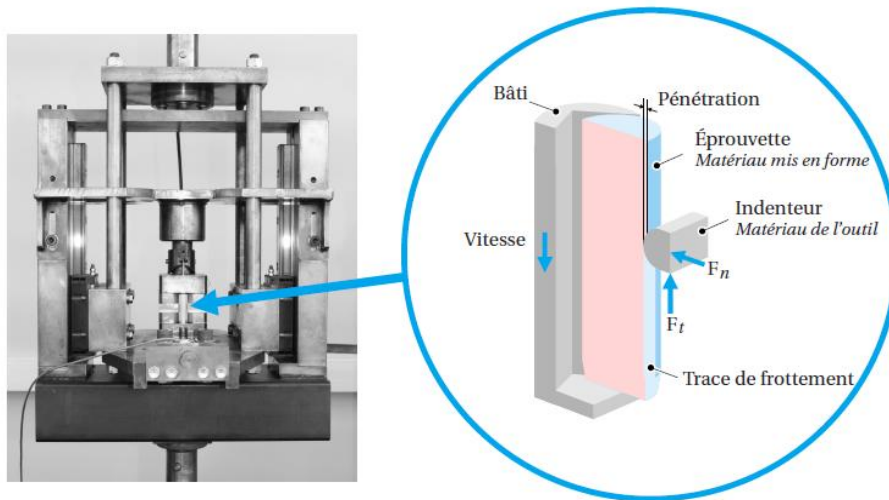


Fig.1 : Photographie du montage et principe de fonctionnement

Indenteur / Configuration	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vitesse de glissement (mm.s ⁻¹)	20	20	20	100	100	100	200	200	200	200
Pénétration (µm)	30	60	100	30	60	100	30	40	60	100

Tab.1 : Configurations testées

2.2 Observation des surfaces

Pour étudier les mécanismes de collage, Nosar et Olsson [14] ont proposé une approche robuste consistant à coupler les analyses de composition par spectrométrie en énergie et la profilométrie optique. Par conséquent, chaque outil de cette étude a été analysé par cette méthode après une distance de glissement de 150 mm. Les mesures profilométriques sont obtenues grâce à l'interféromètre Zygo NewView 7300 et le système d'acquisition MesRug [15] avec un objectif à grossissement x20. La résolution optimale de mesure est de 71 nm latéralement et de 3 nm verticalement. Des petites surfaces de 349 x 262 µm² sont mesurées individuellement puis assemblées avec un taux de recouvrement de 20%. Une surface en trois dimensions de 9.5 x 5.5 mm², décrite par 17536 x 10848 points, est obtenue. Les surfaces des indenteurs sont aussi observées à l'aide d'un MEB à effet de champ Fei Quanta 400. Des images en électrons rétrodiffusés sont acquises et des cartographies élémentaires par EDS sont dressées pour chaque indenteur. Elles permettront de révéler la forme exacte du dépôt grippé en discernant l'aluminium du fer.

3 Résultats et discussion

3.1 Analyse des essais de compression-translation

Au cours des essais, les efforts normal et tangentiel sont relevés. Les courbes du graphique 2.a correspondent aux efforts de la troisième condition d'essai effectuée à une vitesse de 20 mm.s^{-1} pour une pénétration de $100 \mu\text{m}$. La courbe moyenne de chaque effort est représentée par un trait continu. Ce graphique permet de vérifier que le chanfrein usiné à la base des éprouvettes a eu l'effet escompté. Le contact entre l'indenteur et l'éprouvette est progressif jusqu'à une distance de glissement de 5 mm. Les efforts atteignent ensuite un régime stabilisé correspondant à la consigne imposée sur la pénétration. Enfin, les efforts chutent dès que l'indenteur atteint l'extrémité supérieure de l'éprouvette après 45 mm de frottement. Ce graphique permet aussi d'apprécier la reproductibilité des essais. La figure 2.b montre les valeurs moyennes du taux de frottement F_t / F_n pour chaque configuration d'essai. Les configurations 1 et 2 réalisées à 20 mm.s^{-1} présentent un taux de frottement fortement supérieur à ceux observés à haute vitesse. À cette vitesse de glissement, la pénétration ne semble pas avoir d'influence tandis qu'aux vitesses élevées, une corrélation entre la pénétration et le taux de frottement se distingue.

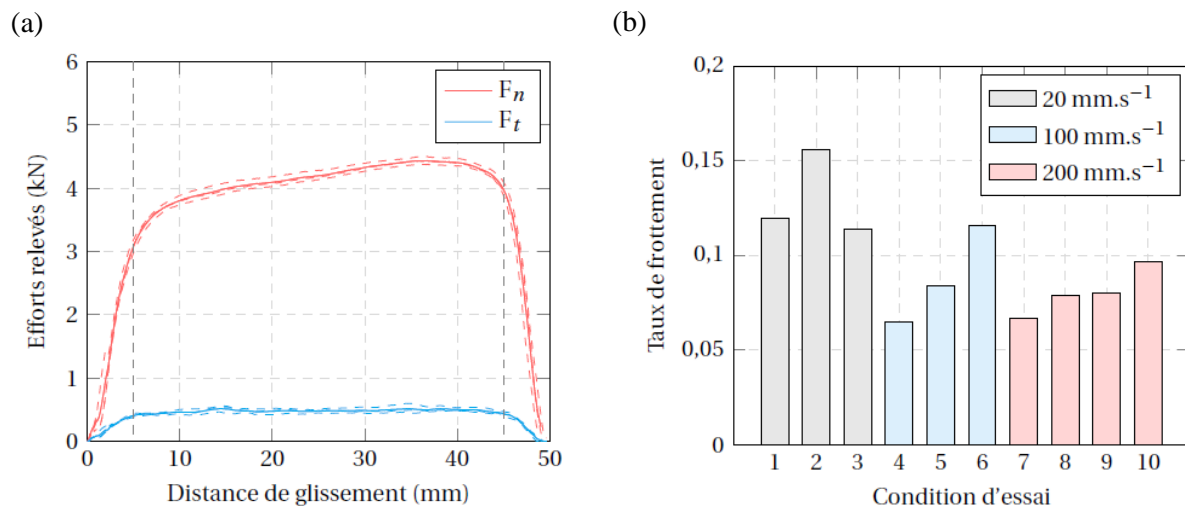


Fig.2 : (a) Efforts normal et tangentiel de la 3^e configuration ; (b) Taux de frottement moyens de chaque configuration

3.2 Analyse des mécanismes de collage

La quantification du volume d'alliage d'aluminium adhérent sur la surface des indenteurs est effectuée après un glissement total de 150 mm. Dans un premier temps, des cartographies élémentaires par EDS sont dressées pour chaque indenteur. Elles permettent de révéler la forme exacte du dépôt grippé en discernant l'aluminium (rouge) et le fer (bleu). La figure 3.a illustre l'analyse EDS du troisième outil. Ensuite, une méthodologie de post-traitement est appliquée aux mesures 3D obtenues par profilométrie optique. La première étape consiste à supprimer la forme cylindrique de l'indenteur sans altérer la trace de frottement. Ceci est réalisé à l'aide d'un polynôme de degré 7 sans tenir compte de la zone où se situe le dépôt. La figure 3.b illustre la topographie résultante du 3^e indenteur après l'élimination de la forme cylindrique. La trace de frottement peut être divisée zones distinctes. La

première est une demi-ellipse où la majorité de l'aluminium semble avoir adhéré. La seconde correspond à la sortie du contact, le dépôt semble alors résiduel.

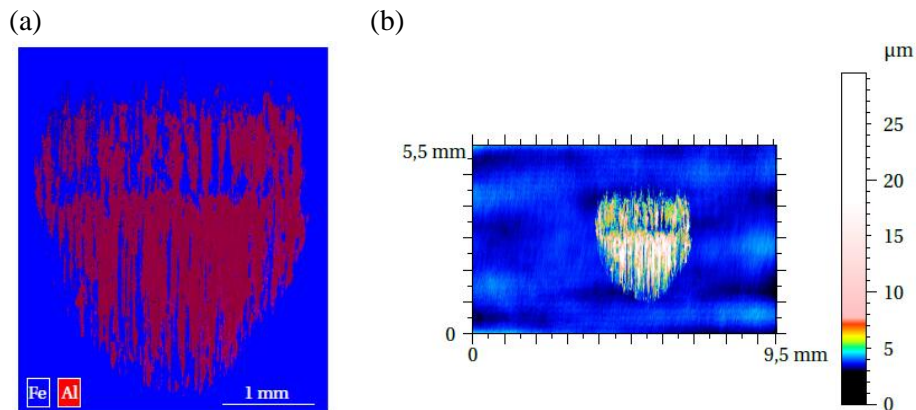


Fig.3 : (a) Analyse EDS du 3^e indenteur ; (b) Relevé topographique du 3^e indenteur après suppression de la forme cylindrique initiale.

Le défi consiste maintenant à évaluer les volumes des pics correspondant au dépôt d'alliage d'aluminium. Une méthode de seuillage basée sur le taux de portance de la surface est utilisée afin d'extraire uniquement la partie grippée. La courbe de portance de la surface est donc tracée en suivant la norme ISO/TS 13565-2 [16]. Le paramètre Mr_1 est défini dans cette norme comme étant le taux de portance déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les pics saillants du profil écrêté. Par conséquent, il est utilisé comme valeur de seuillage. La figure 4.a présente la surface après le seuillage par le taux de portance Mr_1 . La trace de frottement est mise en évidence et sa forme correspond à l'analyse EDS. Le volume du dépôt grippé au cours de l'essai est calculé à l'aide du logiciel MesRug grâce au module de détection des îlots. La figure 4.b montre les volumes mesurés pour chaque condition d'essai à une distance de glissement de 150 mm. Les tendances de ce graphique sont similaires à celles des taux de frottement illustrés en figure 4.a. En effet, les volumes de matière relevés pour les essais à 20 mm.s^{-1} ne semblent pas être influencés par la pénétration, à l'inverse des hautes vitesses. De plus, les volumes des configurations 1 et 2 sont supérieurs à ceux obtenus à haute vitesse, tout comme l'étaient les taux de frottement. Cela suggère un lien entre le coefficient de frottement et les mécanismes d'adhésion.

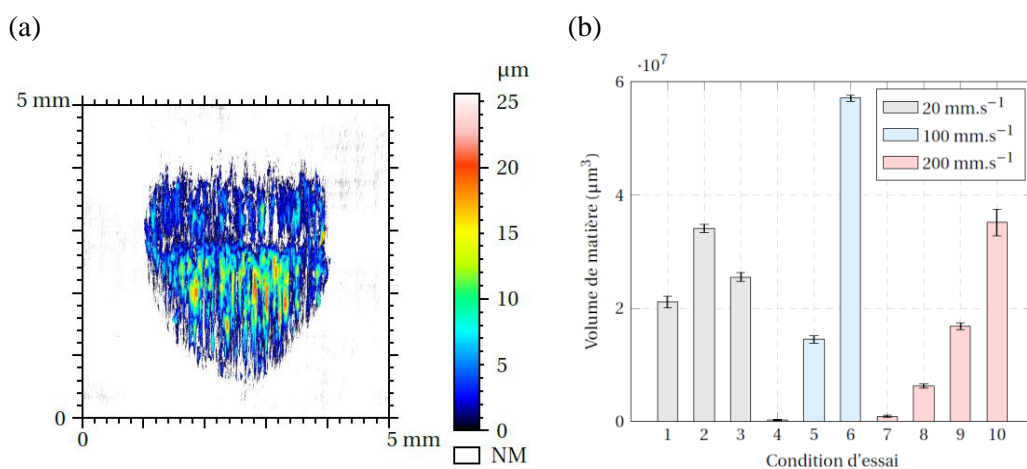


Fig.4 : (a) Topographie seuillée du 3^e indenteur ; (b) Volumes des dépôts de chaque configuration.

Les graphiques suivants montrent le volume de matière mesuré en fonction du taux de frottement moyen obtenu pour les trois vitesses de glissement (figure 2.28). Ceux-ci montrent une forte corrélation entre le taux de frottement et les volumes de matière relevés. De plus, en observant les coefficients des régressions linéaires, il apparaît très clairement que le même régime de collage est observé aux vitesses élevées. À basse vitesse, le volume ne suit pas la même tendance, mais il est toujours lié au taux de frottement, indiquant un second régime.

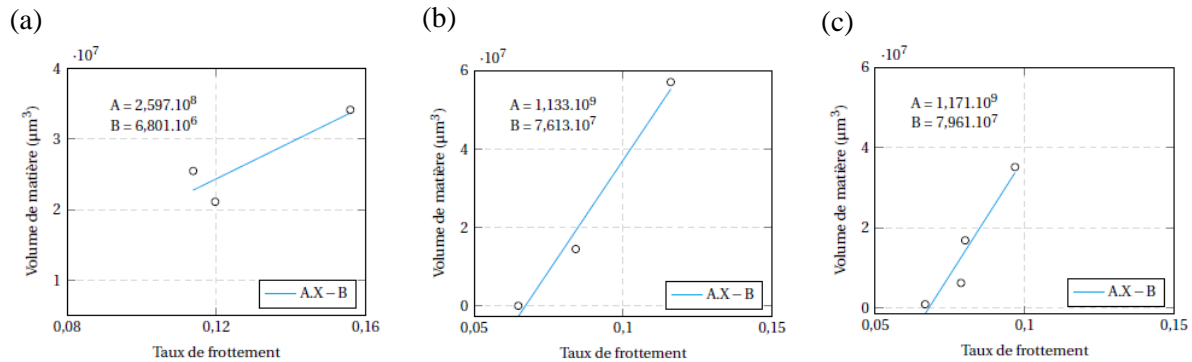


Fig.5 : Volumes des dépôts en fonction du taux de frottement (a) 20 ; (b) 100 ; (c) 200 mm.s⁻¹

4 Conclusion

Le mécanisme d'usure adhésive a été observé sur chacune des conditions d'essai et deux régimes de collage ont été observés en fonction de la vitesse de glissement. Une approche spécifique, combinant la profilométrie optique et les observations au microscope électronique à balayage, a été proposée pour quantifier le volume des dépôts. De plus, une corrélation entre les volumes relevés et le taux de frottement a été mise en évidence. Cela montre l'importance d'intégrer un paramètre représentant le frottement dans les modèles d'usure comme les approches énergétiques basées sur le travail des forces de friction. Pour conclure, afin de mieux comprendre les mécanismes d'adhésion, une modélisation numérique de l'essai de compression-translation sera développée. Cette analyse permettra d'évaluer les pressions de contact et les vitesses de glissement locales à l'interface indenteur / éprouvette. Enfin, un modèle d'usure pourra être développé à l'aide de cette simulation numérique.

5 Remerciements

Ces travaux ont été financés par le conseil régional des Hauts de France, la Communauté Européenne, le Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, l'institut Carnot ARTS et le CNRS. Les auteurs remercient le support de ces institutions. Les auteurs remercient J. Bouquerel (Maître de Conférences, UMET) pour les analyses au MEB, R. Deltombe (Ingénieur de Recherche, LAMIH) pour les acquisitions au profilomètre optique et B. Laurent (Responsable de l'atelier de fabrication, LAMIH) pour la réalisation des éprouvettes.

Références

- [1] T. Altan, G. Ngaile, G. Shen, Cold and hot forging: fundamentals and applications, Vol.1, ASM International, 2005.
- [2] N. Bay, Cold forming of aluminium - State of the art, Journal of Materials Processing Technology, Vol.71, n°1, 1997, pp. 76-90.
- [3] P. Groche, G. Nitzsche, Influence of temperature on the initiation of adhesive wear with respect to deep drawing of aluminium-alloys, Journal of Materials Processing Technology, Vol.191, n°1-3, 2007, pp. 314-316.
- [4] B. Podgornik, J. Jerina, Surface topography effect on galling resistance of coated and uncoated tool steel, Surface and Coatings Technology, Vol.206, n°11-12, 2012, pp. 2792-2800.
- [5] J. Heinrichs, S. Jacobson, Laboratory test simulation of galling in cold forming of aluminium, Wear, Vol. 267, n°12, 2009, pp. 2278-2286.
- [6] J. Heinrichs, S. Jacobson, Laboratory test simulation of aluminium cold forming - influence from PVD tool coatings on the tendency to galling, Surface and Coatings Technology, Vol. 204, n° 21-22, 2010, pp. 3606-3613.
- [7] J. Heinrichs, S. Jacobson, The influence from shape and size of tool surface defects on the occurrence of galling in cold forming of aluminium, Wear, Vol.271, n° 9-10, 2011, pp. 2517-2524.
- [8] J. Heinrichs, M. Olsson, S. Jacobson, Mechanisms of material transfer studied in situ in the SEM: Explanations to the success of DLC coated tools in aluminium forming, Wear, Vol. 292-293, 2012, pp.49-60.
- [9] J. Pujante, L. Pelcastre, M. Vilaseca, D. Casellas, B. Prakash, Investigations into wear and galling mechanism of aluminium alloy-tool steel tribopair at different temperatures, Wear, Vol. 308, n° 1-2, 2013, pp.193-198.
- [10] J. Jerina, M. Kalin, Initiation and evolution of the aluminium-alloy transfer on hot-work tool steel at temperatures from 20°C to 500°C, Wear, Vol. 319, n° 1-2, 2014, pp. 234-244.
- [11] M. Dubar, A. Dubois, L. Dubar, Wear analysis of tools in cold forging: PVD versus CVD TiN coatings, Wear, Vol. 259, n° 7-12, 2005, pp. 1109-1116, 15th International Conference on Wear of Materials.
- [12] A. Dubois, M. Dubar, L. Dubar, Warm and Hot Upsetting Sliding Test: Tribology of Metal Processes at High Temperature, Procedia Engineering, Vol. 81, 2014, pp. 1964-1969, 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.
- [13] J. Bouquerel, B. Diawara, A. Dubois, M. Dubar, J. B. Vogt, D. Najjar, Investigations of the microstructural response to a cold forging process of the 6082-T6 alloy, Materials & Design, Vol. 68, 2015, pp. 245-258.
- [14] N. S. Nosar, M. Olsson, Influence of tool steel surface topography on adhesion and material transfer in stainless steel/tool steel sliding contact, Wear, Vol. 303, n° 1-2, 2013, pp. 30-39.
- [15] R. Deltombe, K. J. Kubiak, M. Bigerelle, How to select the most relevant 3D roughness parameters of a surface, Scanning, Vol. 36, n°1, 2014, pp. 150-160.
- [16] ISO/TS 13565-2, Geometrical product specifications (GPS) - Surface method: Profile method, Surfaces having stratified functional properties - Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve, International Organization for Standardization.