

Analyse expérimentale et modélisation du procédé de polissage abrasif de l'INOX 316L

F. GOOSSENS, M. CHERIF, O. CAHUC

Université de Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

Résumé :

Le polissage des pièces métalliques est le procédé requis pour donner des caractéristiques précises aux surfaces comme la texture et la rugosité. Or, les opérations attachées à ce procédé font essentiellement appel au savoir-faire et à la dextérité des opérateurs limitant ainsi leur répétabilité, leur mécanisation et leur rentabilité. Pour optimiser l'industrialisation du polissage d'une pièce, il est donc nécessaire de disposer de bases de données plus étoffées et de modèles sur ce procédé.

La modélisation et l'optimisation du procédé de polissage pour l'obtention de surface type « poli-miroir » a donné lieu à de nombreuses études. En particulier les aspects cinématiques des trajectoires et les modèles d'usure des systèmes abrasifs ont été analysés.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons au procédé de polissage par bandes abrasives. Ce procédé de polissage est dépendant de nombreux paramètres (nature de l'abrasif, granulométrie, efforts presseur, vitesse de défilement) qui conditionnent la qualité de l'état de surface obtenu en terme de texture, de rugosité, mais également d'intégrité matière.

Dans le cadre de cette étude, une méthodologie expérimentale est mise en place sur un banc instrumenté de polissage pour analyser l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la surface obtenue par polissage d'un acier inoxydable INOX 316L. Après la mise en place d'indicateurs caractéristiques des propriétés de la surface initiale (dureté, rugosité, ondulation, mouillabilité, etc.) et du procédé (type d'abrasif, effort presseur, cinématique, etc.), une modélisation de l'impact du procédé de polissage sur ces différents indicateurs sera proposée puis validée à partir des résultats expérimentaux obtenus.

Abstract :

Finishing process like polishing are usually used to obtain high surface quality for mechanical part. These operations are mainly handmade and need highly trained operators. The automation of the polishing needs the modeling of the abrasive cutting process. Modeling and optimization of the polishing process has been addressed in numerous studies. Kinematic aspects of the trajectories and wear models of the abrasive were analyzed.

In this paper, we focus on the process of polishing with abrasive belt. The polishing process depends on many parameters (nature of the abrasive particle, size, pressure forces, belt speed,...). These parameters determine the quality of the surface finish obtained in terms of texture and roughness, but also the surface integrity.

In this study, an experimental methodology was set up on a polishing instrumented bench to analyze the influence of different parameters on the characteristics of the obtained surface. The polishing trials were conducted on stainless steel AISI 316L.

The global objective of this work is to propose a model of the effect of the polishing process parameters (abrasive type, pressure forces, kinematics, etc.) on the surface properties (hardness, roughness, waviness, wettability, etc.). This model will be validated by the experimental result.

Mots clefs : polissage, rugosité, effort presseur, débit enlèvement matière

1 Introduction

Cet exposé est centré sur l'usinage par abrasion. La coupe du matériau est assurée par des grains abrasifs, particules poly formes très dures d'oxyde d'aluminium ou de diamant. En fonction de l'objectif visé, ces derniers peuvent être assemblés de manière compacte pour former des meules, collés sur un support souple ou sur des fibres synthétiques entremêlées ou bien déposés sur des brins ou des bandes souples. Ainsi, la concentration et la taille des grains jouent un rôle déterminant dans le résultat obtenu.

Le tronçonnage au disque et la rectification s'apparentent à l'usinage par outils coupants à savoir que la géométrie de la pièce usinée est obtenue par la conjonction d'un mouvement de coupe et de la trajectoire de l'outil par rapport à la pièce appliquée rigidement par une machine-outil. Les efforts appliqués par le disque ou la meule sur la pièce sont la résultante des paramètres géométriques et cinématiques en place (pouvoir abrasif, vitesse de coupe, vitesse d'avance,...).

Par contre, pour un grand nombre d'applications d'usinage par abrasion, l'effort presseur est modulable et joue un rôle déterminant sur le résultat recherché. Ces procédés permettent d'assurer deux fonctions : corriger la géométrie et obtenir un état de surface. La première est primordiale lors de l'arasage des cordons de soudure, la préparation des bords des pièces mécano-soudées, l'ébavurage des pièces moulées ou matricées ou la suppression des sillons d'usinage d'une fraise boule. Une attention particulière pour l'état de surface est motivée pour des questions d'esthétique. Cela va de la suppression des éraflures subies au cours du processus de fabrication jusqu'à la gestion de l'éclat comme dans la bijouterie ou le mobilier urbain. La mise en peinture impose une certaine texture de surface pour favoriser l'accroche du revêtement. La très faible rugosité des surfaces favorise la tenue des pièces à la fatigue ou à la corrosion. La qualité « poli miroir » est requise pour certaines prothèses afin de limiter au strict minimum le frottement et, par là, la création de résidus indésirables dans le corps humain ou bien lors de la réalisation de moules en vue d'injecter des pièces plastiques transparentes.

A de rares exceptions près, ces différentes applications font appel au savoir faire et à la dextérité des opérateurs pour contrôler trajectoire, effort presseur, durée de l'opération, usure de l'outil... Ces procédés sont donc pénalisés vis-à-vis de la répétabilité au sein d'un même atelier et de leur mécanisation. Pour optimiser l'industrialisation de l'usinage par abrasion et plus particulièrement du polissage d'une pièce, il est nécessaire de disposer de modèles et de bases de données plus étoffées sur ce procédé.

Dans ce but, après avoir établi un état de l'art sur les questions abordées dans cet article, nous proposons une démarche pour caractériser les opérations de polissage. Nous avons appliqué celle-ci à un premier couple outil-matière : un abrasif structuré TRIZACT de chez 3M et une tôle inox 316L. Nous présentons et analysons les résultats obtenus.

2 État de l'art

Les travaux menés à ce jour se divisent en trois catégories en fonction de l'échelle de l'étude.

Au niveau microscopique, une rayure peut être réalisée par un indenteur dont la géométrie est connue (FIG. 1). Différents écoulements de la matière sont observés et sont synthétisés sur la FIG. 2. Des approches expérimentales [1], [2] ou par simulation numérique [3] ont été conduites pour mieux caractériser les phénomènes en jeu. Les images de rayures proposées FIG. 3 confirment la complexité du phénomène [4].

L'approche macroscopique, deuxième niveau d'étude, est de considérer l'effet global d'un outil abrasif sur une portion de matière. Issue du polissage du verre, la loi de PRESTON fait référence dans le domaine du polissage [7]. Elle met en avant le taux d'enlèvement matière par unité de temps, celui-ci est proportionnel à la vitesse de défilement, à l'effort presseur et au pouvoir abrasif (eq 1). Ce dernier est lié principalement à la taille des grains et à la nature du matériau poli (dureté, résistance mécanique,...).

$$TEM = C_p \cdot F \cdot V \quad (\text{eq } 1)$$

Des améliorations de la loi de PRESTON ont été mises en place pour prendre compte plus de paramètres sans pour autant permettre sa généralisation [8], [9], [10]. Aussi, des travaux ont été menés pour caractériser l'usure des outils abrasifs [11].

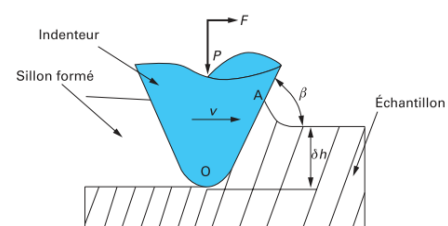
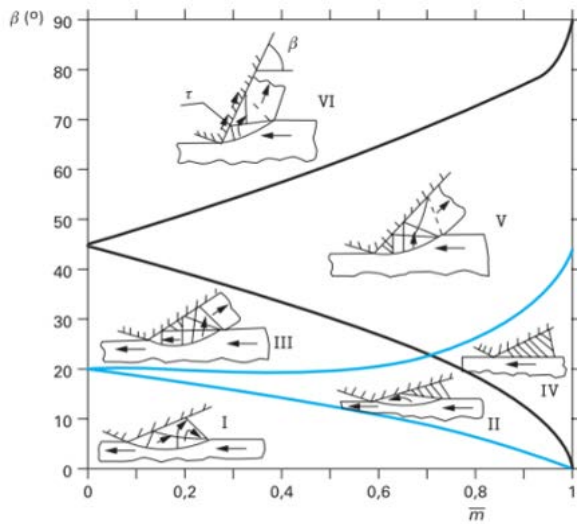


FIG. 1 – Géométrie indentation [5]



Écoulement I : vague plastique ; II : vague + arête rapportée ; III : vague + copeau ; IV : arête rapportée ou bourrelet adhésif ; V : copeau + arête rapportée sous la pointe ; VI : copeau

FIG. 2 – Écoulement de la matière en fonction du coefficient de frottement \bar{m} et de l'angle β de l'indenteur [6]

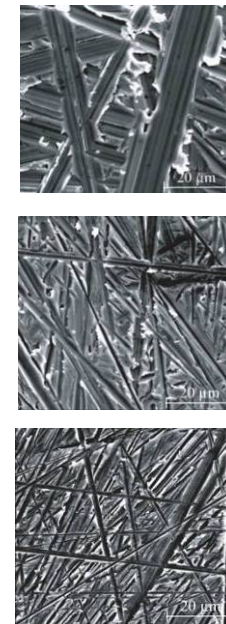


FIG. 3 – Rayures réalisées dans de l'inox 316L avec des grains de tailles différentes [4]

Enfin, le troisième niveau d'étude est de considérer l'opération de polissage dans son ensemble. Il faut rajouter aux éléments vus précédemment le mouvement de balayage de l'outil sur la surface à polir [12], la capacité à maîtriser l'effort presseur [11] et les performances des machines outils [13].

3 Démarche

Nous avons vu dans l'introduction que l'emploi du polissage était varié et que différents objectifs pouvaient être poursuivis. Nous avons donc réfléchi à une démarche permettant de caractériser le procédé de polissage indépendamment de l'objectif poursuivi. Elle est basée sur la mise en place d'un process de caractérisation qui permet de mettre en avant tous les paramètres influents du procédé (FIG. 4).

Cette démarche a pour but de caractériser le résultat obtenu à l'occasion d'une opération de polissage. Il porte à la fois sur la surface polie et sur les performances de l'abrasif utilisé. Il en découle aussi le coefficient de coupe tangentiel, rapport entre l'effort de coupe tangentiel et l'effort presseur. Pour obtenir ces éléments, des informations portant sur la surface à polir, le matériau et l'abrasif doivent être fournies. Aussi, doivent être précisés les conditions d'usinage étudiées.

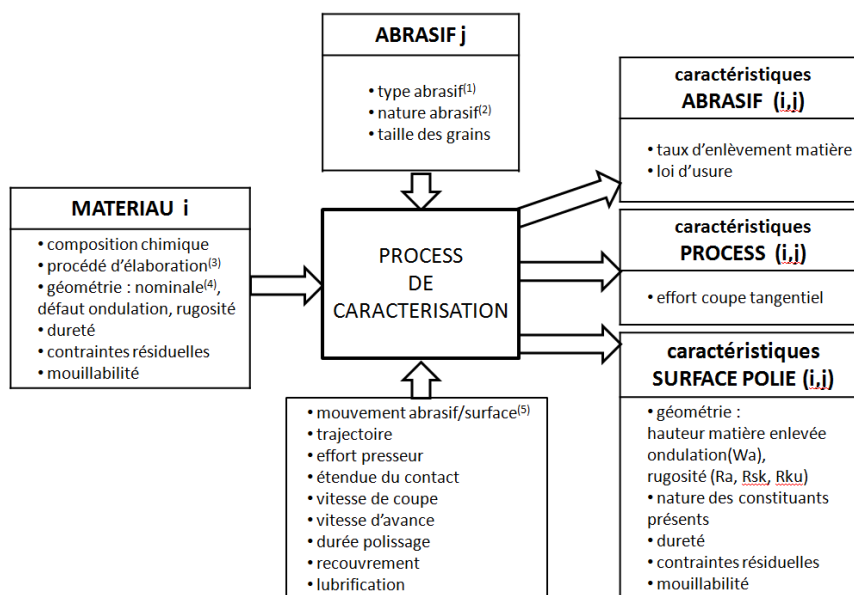


FIG. 4 – Paramètres caractérisant une opération de polissage

4 Application au polissage d'une tôle INOX316L et des bandes abrasives TRIZACT

Pour appliquer la démarche présentée ci-dessus, nous avons choisi de la centrer sur une application très développée à savoir le polissage de tôle INOX. Dans le cadre de notre étude, nous avons sélectionné un abrasif industriel (TRIZACT - 307EA, 3M). L'originalité de ce produit est d'être formé par micro-réplication de pyramides de grains abrasifs ayant pour base 0.5 x 0.5 mm et 0.3mm de hauteur (FIG. 5). L'utilisation de ce type d'abrasif structuré (taille, géométrie, l'orientation des éléments abrasifs) permet de garantir la reproductibilité du processus de polissage en terme de taux d'enlèvement de matière et de qualité de polissage. Les grains sont en oxyde d'aluminium et le liant est une résine chimique. Plusieurs tailles de grains ont été retenues pour nos expérimentations : A100, A45, A30 et A16. Cela correspond à une granulométrie FEPA : P180, P400, P800 et P1200.

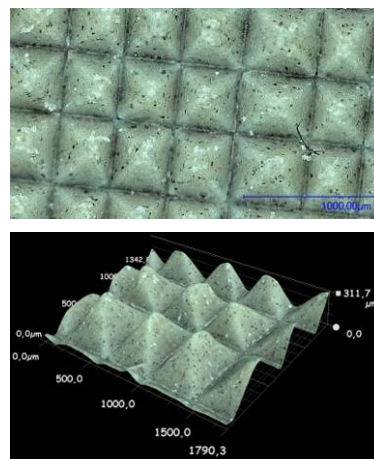


FIG. 5 – Mise en forme pyramidale des grains abrasifs des bandes TRIZACT

Afin de caractériser cette opération de polissage, un banc d'expérimentation a été conçu et réalisé (FIG. 6). Il est composé d'une ponceuse pneumatique professionnelle à bande DINABRADE 14200 (vitesse à vide = 33 m/s). L'absence de mouvement de celle-ci dans le plan de l'échantillon et le défilement linéaire de l'abrasif permettent d'offrir une meilleure exploitation des efforts en jeu dans une opération de polissage (effort presseur et effort tangentiel de coupe). Ces efforts sont mesurés avec un capteur dynamométrique à six composantes. Pour assurer le placage de la ponceuse sur l'échantillon (40 x 70 x 2 mm), celle-ci est guidée en translation par des douilles à billes montés sur deux colonnes rigides et l'effort presseur est délivré par un vérin pneumatique. Sa pression d'alimentation est modulée par un régulateur de pression. Enfin, la vitesse de défilement de la bande est gérée par un régulateur de débit à vis pointeau. Elle est mesurée au moyen d'un détecteur photoélectrique. L'acquisition et le traitement des signaux de mesure sont assurés par un ordinateur DEWETRON 2600.

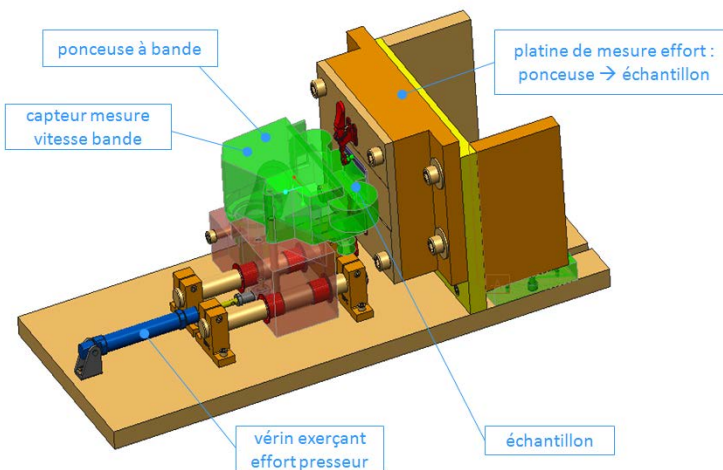


FIG. 6 – Banc de caractérisation du process de polissage

5 Observations et résultats

5.1 Protocole des essais

Les observations présentées ici ont pour objectif de définir le coefficient de coupe tangentiel, rapport entre l'effort de coupe tangentiel (F_x) et l'effort presseur (F_z), ainsi que le débit d'enlèvement de matière, c'est à dire la quantité de matière enlevée par unité de temps pour des conditions de polissage nominalement constantes. Les quatre tailles de grains TRIZACT 307EA A100, A45, A30 et A16 ont été testées. Les bandes étaient neuves au lancement des opérations de polissage. La largeur de la surface polie correspond à la largeur de la bande abrasive soit 25 mm. La tôle INOX 316L a une épaisseur de 2mm. Chaque échantillon a été préalablement poli avec une bande ayant la même taille de grain que celle utilisée pour mener les essais. L'objectif est de donner la forme du patin presseur afin que l'enlèvement de matière soit identique en tout point de l'échantillon. Après différents tests d'étalonnage, l'effort presseur (F_z) au cours des différents polissages a été réglé à 10N avec une fluctuation de +/- 1N. La vitesse de défilement de la bande au cours du polissage était de 23 m/s avec une fluctuation de +/- 1 m/s.

5.2 Déroulement des essais

Les durées de polissage avec chaque bande ont été 5 / 10 / 10 / 20 / 20 / 20 minutes. Cependant la couture de jonction des bandes a cédée avant l'usure totale des bandes. La durée totale a donc été de 12 mn pour le grain A16 (celle-ci sera écartée de la présentation des résultats), 42 mn pour le grain A30, 70 mn pour le grain A100 et 105 mn pour le grain A45.

5.3 Coefficient de coupe tangentiel

La FIG. 7 présente un synoptique des efforts relevés au cours d'une séquence de polissage. On remarque notamment que les efforts mesurés sont relativement stables une fois le processus de polissage en place. Il en est de même pour la vitesse V de défilement de la bande.

Pour les essais menés, l'évolution du coefficient de coupe tangentiel est présenté FIG. 8. Celui-ci semble se placer dans une plage identique quelque soit la granulométrie des grains abrasifs utilisée.

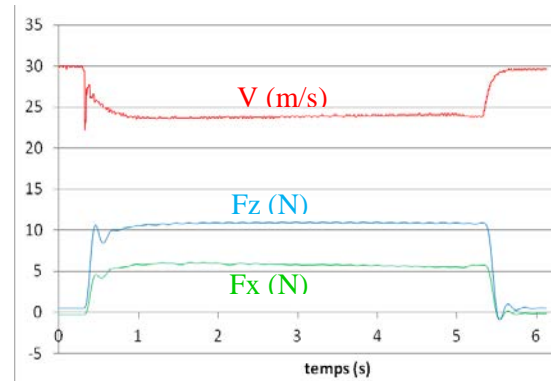


FIG. 7 – Relevé des efforts Fz, Fx et de la vitesse V de défilement de la bande

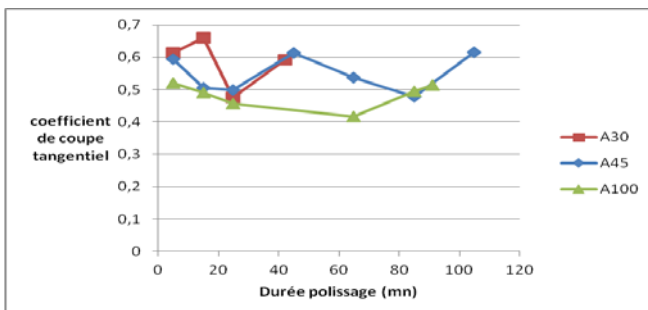


FIG. 8 – Évolution du coefficient de coupe tangentiel

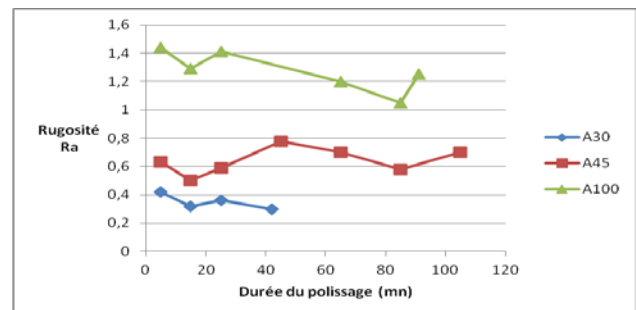


FIG. 9 – Évolution de la rugosité (Ra)

5.4 Rugosité

La rugosité (critère Ra) a été relevée à chaque pause du polissage. La FIG. 9 met en avant des fluctuations importantes de celle-ci. Des mesures complémentaires seront effectuées par la suite pour mettre en place une analyse de critères surfaciques type taux de portance plus représentatifs des surfaces obtenues.

5.5 Volume de matière enlevée

A chaque pause dans le polissage, l'empreinte laissée par l'abrasif a été relevée à l'aide d'un rugosimètre 3D ALTISURF500. Trois relevés ont été effectués sur la longueur de l'échantillon. Chaque profil est orthogonal au sens de parcours des grains abrasifs. L'espace entre deux points de mesure a été fixé à 5 µm. Chaque profil a été ensuite redressé pour prendre en compte les imperfections des échantillons puis filtré avec un filtre à phase correcte de 50% comme présenté dans la norme ISO11562. Le profil d'ondulation a été utilisé pour quantifier la surface de matière retirée par l'abrasif dans chaque section de mesure. Les profils successifs obtenus en position centrale avec une bande de grain A45 sont présentés FIG. 10. Pour obtenir le volume de matière enlevée, une moyenne a été faite à partir des trois profils. L'évolution de ces volumes au fil des essais est présentée FIG. 11.

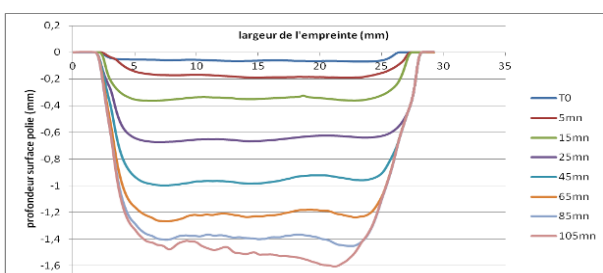


FIG. 10 – Profils successifs de la surface polie

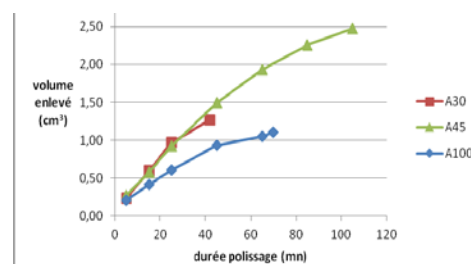


FIG. 11 – Évolution du volume de matière enlevée

6 Conclusion et perspectives

Pour arriver à mieux cerner les conditions de mise en œuvre du polissage des pièces métalliques, il est nécessaire d'élaborer des modèles et des bases de données sur ce procédé. L'objectif des travaux présentés est de proposer une démarche et un mode opératoire permettant d'y contribuer. Les premiers essais ont porté sur le polissage de tôle en INOX 316L à l'aide d'abrasifs structurés de type TRIZACT de chez 3M. L'évolution du coefficient de coupe tangentiel, de la rugosité et du débit d'enlèvement de matière a été présentée. D'autres conditions de polissage en termes d'effort presseur et de vitesse de défilement devront être étudiées. Aussi, la conduite des prochains essais devra permettre d'utiliser la quasi-totalité des grains abrasifs présents sur chaque bande. Il sera alors intéressant de voir évoluer le débit d'enlèvement de matière, la rugosité et le coefficient de coupe tangentiel quand la surface effective de contact des sommets des pyramides augmente au fur et à mesure que la hauteur de celles-ci se réduit. A titre indicatif, la FIG.12 donne l'état des pyramides après 105 mn de polissage avec la bande de grain A45.

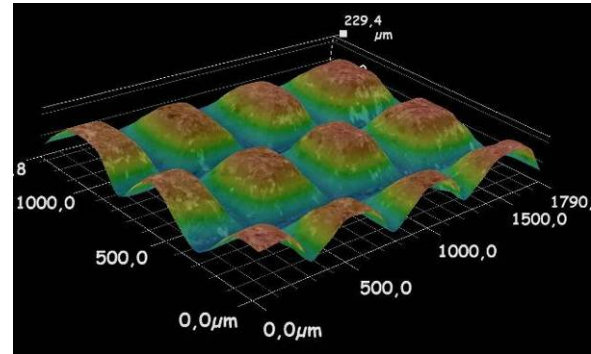


FIG. 12 – État des pyramides de grains abrasifs après 105 mn de polissage

Ce travail a été conduit dans le cadre du groupe de travail Manufacturing 21 qui regroupe 18 laboratoires de recherche français. Les thèmes étudiés sont : la modélisation du processus de fabrication, l'usinage virtuel, le développement de nouvelles méthodes de fabrication.

References

- [1] Barge M., Rech J., Hamdi H., Bergheau J.M., Experimental study of abrasive process. *Wear*, Volume 264, Issues 5–6, 4 March 2008, pages 382-388
- [2] Puntous T., Delafosse D., Jourlin M., Rech, J., Visual evaluation of standard scratches in the polishing quality control, *INTERCUT 2012 - MUGV 2012*, pages 16-18.
- [3] Rouault de Coligny P., Analyse et optimisation du procédé de découpe de plaques de silicium. Thèse de doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, École des Mines de Paris (2002).
- [4] Giljean S., Najjar D., Bigerelle M., Analyse multi-échelle de l'abrasion. *Mécanique & Industries*, Volume 7, Issue 01, 2006, pages 13-20
- [5] Felder E., Usinage par abrasion - Principes généraux. *Techniques de l'ingénieur*.
- [6] Petryk H., Slip line field solutions for sliding contact. *Proc. I. Mech. Engrs Int. Conf. Tribology : friction, lubrication and wear (Londres) C140/87*, p. 987-994 (1987).
- [7] Preston F., The theory and design of plate glass polishing machines. *Journal of the Society of Glass Technology*, 11:214–256, 1927.
- [8] Luo Q., Ramarajan S., Babu S., Modification of the Preston equation for the chemical-mechanical polishing of copper. *Thin solid films*, 335:160–167, 1998.
- [9] Klocke F., Chandra A., Zunke R., Karra P., Modeling of material removal in polishing of advanced ceramics. *Other Abrasive Machining Processes*, p597–604, 2010.
- [10] Wang C.-C., Lin S.-C., Hochen H., A material removal model for polishing glass-ceramic and aluminium magnesium storage disk. *International journal of machine tool and manufacture*, 42:979–984, 2002.
- [11] Guiot A., Tournier C., L. Mathieu, Simulation of the material removal rate and tool wear to improve 5-axis automatic polishing operations. *8th International conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering - Virtual Concept 2010*, 2010.
- [12] Pessoles X. et Tournier C., Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center. *Journal of Materials Processing Technology*, 209:3665–3673, 2009.
- [13] Tournier C., Iabassene C., Guiot A., Quinsat Y., Grinding of medical implants in cobalt-chromium alloy. *1st International Conference on Design and PROCesses for MEDical Devices*, Italy 2012