



HAL
open science

Contribution à l'étude de la formation du copeau en micro-coupe d'un cuivre pur

Martin Boyer, Romain Piquard, Alain d'Acunto, Gael Le Coz

► **To cite this version:**

Martin Boyer, Romain Piquard, Alain d'Acunto, Gael Le Coz. Contribution à l'étude de la formation du copeau en micro-coupe d'un cuivre pur. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784357

HAL Id: hal-04784357

<https://hal.science/hal-04784357v1>

Submitted on 15 Nov 2024

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.



Contribution à l'étude de la formation du copeau en micro-coupe d'un cuivre pur

Martin BOYER^(a), Romain PIQUARD^(a), Alain D'ACUNTO^(a), Gaël LE COZ^(a)

(a) Université de Lorraine, CNRS, Arts et Métiers, LEM3, F-57000 Metz

Mail : romain.piquard@univ-lorraine.fr

Résumé : La directives Reach prévoit de limiter les dérogations à l'emploi de certaines substances nocives, parmi lesquelles figure le plomb. Celui-ci en tant qu'élément d'alliage favorise grandement l'usinabilité des matières principalement utilisées en décolletage notamment pour les cuivreux. Cependant la diminution ou la suppression du plomb entraîne des problématiques techniques de fragmentation du copeau et à l'interaction outil matière. Dans ce contexte, des études précédentes ont montré la génération de bourrelets, lors de la micro-coupe de matériaux ductiles, dont le déclenchement et la répétition cyclique font l'objet d'un questionnement sur les phénomènes thermomécaniques présents. L'échelle d'observation (quelques micromètres) rend l'observation particulièrement difficile. Afin de comprendre le mode de formation de ces micro-copeaux et le déclenchement de ces bourrelets, il est proposé dans cette étude une mesure des efforts lors de la micro-coupe orthogonale d'un cuivre pur mais aussi de proposer une technique avancée d'observation nanométrique pour la caractérisation des copeaux micrométriques par l'utilisation d'un microscope électronique haute résolution intégrant une colonne ionique (FIB, Focussed Ion Beam). L'analyse des grains et de leur recristallisation, parfaitement observables dans le copeau, est une avancée pour la définition des scénarii thermomécaniques liés à la génération des bourrelets.

Mots clés : Cuivre, micro-usinage, FIB, grains, recristallisation.

1 Introduction

Le cuivre et ses alliages (notamment le laiton) sont largement utilisés dans l'usinage de précision et le micro-usinage (domaines d'application : optique, électronique, horlogerie et secteur médical). Ces techniques sont donc soumises aux directives européennes, notamment les directives REACH et RoHS qui prévoient des restrictions sur l'utilisation de certaines substances nocives telles que le plomb. Cependant il n'existe pas encore d'alternatives appropriées à la substitution du plomb dans les alliages de cuivre pour l'usinage. Il existe donc une exemption pour ces matériaux, qui sera réexaminée en 2025 (*Directive déléguée (UE) 2023/544* 2022). En tant qu'élément d'alliage, il améliore considérablement l'usinabilité des matériaux principalement utilisés dans le décolletage. Le plomb réduit de moitié la longueur de contact entre l'outil et le copeau, se traduisant par un coefficient de frottement plus faible. Le plomb change de forme, passant d'une forme globulaire à une forme lamellaire lorsque le matériau traverse la zone de cisaillement primaire, permettant de favoriser la formation de copeaux discontinus (Johansson et al. 2022). La réduction ou l'élimination du plomb entraîne donc des problèmes techniques en termes de fragmentation des copeaux et d'interaction entre l'outil et le matériau. Des copeaux plus longs sont formés, des efforts et des températures de coupe plus élevées sont générées et l'usure de l'outil est plus importante. Ces phénomènes sont le résultat d'une ductilité et d'un écrouissage plus faible et d'une conductivité thermique plus élevée (Schultheiss et al. 2017). Si cette problématique est traitée à l'échelle macro (Nobel et al. 2014), les techniques de micro-usinage ne peuvent pas bénéficier pleinement des connaissances sur l'usinage conventionnel en raison de la différence d'échelle, appelée effet de taille (Balázs et al. 2021) : épaisseur du copeau non déformé à l'échelle du micron, du même ordre de grandeur que l'acuité de l'arête de coupe, des déviations (flexion de l'outil, erreur de positionnement de la machine, qualité du système d'usinage), ou de la microstructure. Des différences notables ont été observées dans les efforts spécifiques de coupe liées aux mécanismes de formation des copeaux, au comportement thermique de l'interface outil-copeau (Yang et al. 2011) ou à la formation de bavures (Weinert et Petzoldt 2008).

En particulier, une géométrie particulière du copeau est observée lors de la coupe élémentaire d'un cuivre (Piquard 2016) et fait depuis l'objet d'investigations. Un phénomène proche a été observé lors de la micro-coupe du cuivre pur (Ding et al. 2012) et de l'aluminium 6061 (Ding et Rahman 2012) avec un outil diamant, pour de très faibles épaisseurs h ($<0,8\mu\text{m}$) et pour des vitesses de coupe faibles (1 mm/min) et des grains de plus grande taille ($50\mu\text{m}$). L'objectif des auteurs est de mesurer les variations des efforts de coupe en fonction de l'orientation des grains. Ils notent également la présence de bourrelets sur la face libre des copeaux et définissent ce phénomène par le terme de *scaling*. Il est généré lors du passage de l'arête de coupe sur le joint de grain, entraînant un angle de cisaillement plus faible et la formation d'un copeau plus épais. Ce même phénomène apparaît à des vitesses de coupe conventionnelles lors de la micro coupe d'un TiNb, matériau également ductile, en englobant plusieurs grains TiNb (Le Coz et al. 2022). Le déclenchement et la répétition cyclique de ce phénomène de bourrelet réduit l'usinabilité du cuivre pur et fait donc l'objet d'un questionnement sur les phénomènes thermomécaniques présents.

L'objet de l'étude est ainsi de proposer une observation fine de ces bourrelets pour un matériau ductile, le cuivre pur, et un matériau moins ductile, un cuivre pur modifié structurellement. Des essais de coupe orthogonal sont menés pour différentes épaisseurs de copeau non déformés et plusieurs vitesses de coupe. Par ailleurs, il est ici proposé une technique avancée d'observation nanométrique pour la caractérisation des copeaux micrométriques par l'utilisation d'un microscope électronique haute résolution intégrant une colonne ionique (FIB, Focussed Ion Beam).

2 Matériel et méthode

2.1 Cuivres purs

Deux éprouvettes de cuivre commercialement pur sont utilisées, l'une ayant été modifiée structurellement par un dispositif ECAE. Celui-ci consiste à presser un barreau de métal à travers une matrice constituée de deux canaux égales formant un angle φ . Au cours du procédé, l'échantillon subit une déformation localisée dans une bande de cisaillement et retrouve sa géométrie initiale réduisant la taille des grains et modifiant les propriétés mécaniques. Dalla Torre et al. (Dalla Torre et al. 2004) montrent ainsi que la limite d'élasticité du cuivre évolue de 70 MPa à 340 MPa dès la première passe ECAE, permettant une nette amélioration de l'usinabilité (D'Acunto et al. 2015).

2.2 Micro coupe

Tableau 1 : Conditions de coupe du plan expérimental

Matière	r_β Outil (μm)	w (μm)	h (μm)	V_c (m/min)
Cuivre pur	1.5	300	3	6
			6	30
Cuivre ECAP 1 passe			20	65

Des éprouvettes cylindriques sont préparées afin de réaliser une coupe orthogonale par une méthode du tube, largement éprouvée dans des études antérieures pour la micro-coupe orthogonale (Piquard et al. 2017). Un centre d'usinage est transformé en tour de précision en plaçant l'échantillon dans la broche, l'outil étant fixé à la table de la machine. Une opération de tournage interne et externe est réalisée au préalable pour obtenir une largeur (w) souhaitée de 300 μm sur un diamètre (D) de 9,55 mm. Comme le diamètre est beaucoup plus grand que la bande de coupe w , on suppose que des conditions de coupe orthogonales sont atteintes. Cette approche permet d'atteindre des vitesses de coupe similaires à celles d'un procédé industriel. Les conditions opératoires retenues sont 3 vitesses de coupe (V_c) de 6, 30 et 65 m/min. L'étude se place donc dans un rapport de vitesse large, dans des conditions fournies par l'outilleur (30 et 62 m/min) et volontairement dégradées à la plus faible vitesse de coupe. L'épaisseur de coupe non déformée (h) est de 3, 6 et 20 μm , égale à l'avance par tour ($\mu\text{m}/\text{tr}$). L'outil sélectionné est en carbure de tungstène micro-grains (nuance K10) revêtu d'une couche TiAlN. Il

présente un rayon d'acuité d'arête (r_β) d'environ $1,5 \mu\text{m}$, un angle de coupe de 8° et un angle de dépouille de 7° . L'étude se place donc dans un rapport $h > r_\beta$ à $h \gg r_\beta$. Les efforts de coupe sont mesurés avec une platine dynamométrique Kistler 9119A.

2.3 Microscopie

En vue d'analyser les copeaux obtenus et compte tenu des dimensions des éléments à observer, l'utilisation d'un microscope électronique à balayage (MEB) a été retenue. Il s'agit d'un MEB JEOL IT200 basse pression permettant un changement d'échantillon rapide.

Un échantillon a aussi été analysé sur un MEB équipé d'une colonne ionique FIB permettant de faire une section locale d'un bourrelet pour en observer la microstructure.

3 Résultats et discussion

3.1 Efforts de coupe

Les efforts de coupe ont été mesurés pour l'ensemble des conditions opératoires et présentent une instabilité des signaux bruts. La Figure 1 reporte les valeurs moyennes obtenues divisées par l'épaisseur de coupe. L'évolution des efforts spécifiques de coupe suit une courbe exponentielle, obtenue classiquement lors de la réalisation d'essais à avance par tour variable. L'effet de la vitesse de coupe semble plus négligeable. Au contraire, l'effet de la structuration du cuivre joue un rôle important, en particulier aux très faibles avances, avec un effort spécifique bien inférieur. Ce résultat est à mettre en relation avec les résultats obtenus en fraisage pour lesquels une forte bavure présente pour le cuivre a été grandement limitée par l'effet de l'ECAE (D'Acunto et al. 2015).

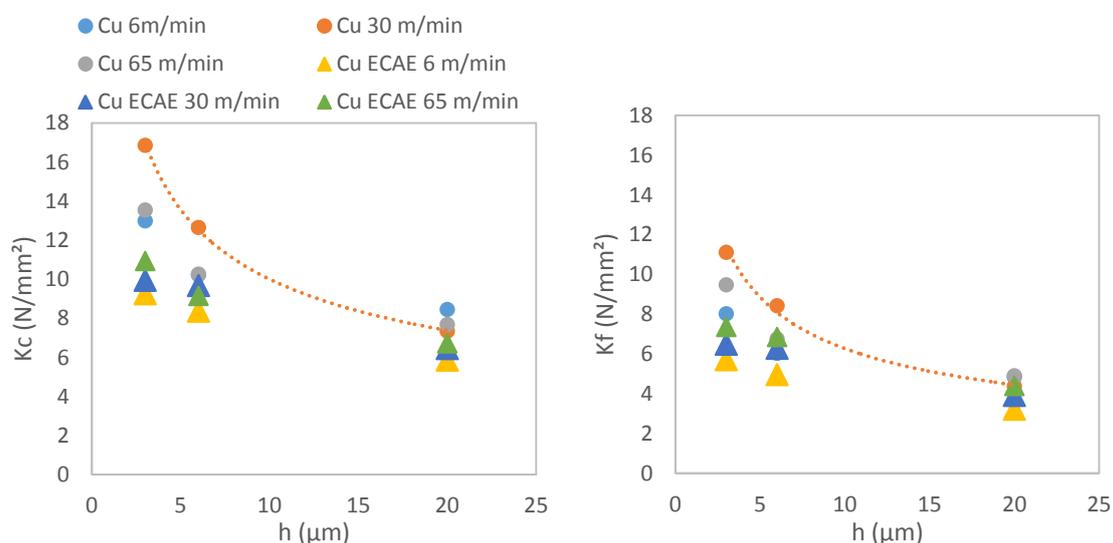


Figure 1. Effet de l'épaisseur de copeau non déformé sur l'effort spécifique de coupe (a) dans la direction de coupe et (b) la direction d'avance

3.2 Geometries de copeaux

Les copeaux obtenus lors de la coupe des deux échantillons de cuivre sont observés figures 2(a) et 2(b). Ils présentent chacun un faciès de bourrelet comme observés

précédemment (Piquard 2016) mais leur géométrie apparaît avec quelques particularités propres.

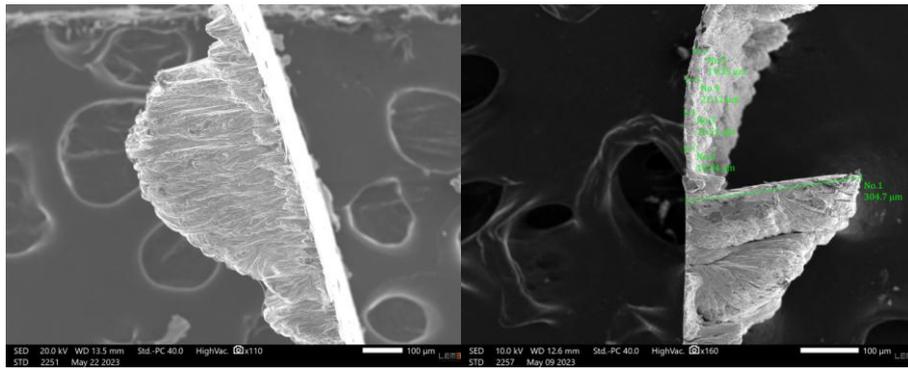


Figure 2. Observation au MEB des bourrelets obtenus lors de la coupe (a) d'un cuivre pur avance une vitesse de coupe de 30 m/min et une avance de 20 $\mu\text{m}/\text{tour}$ et (b) d'un cuivre nanostructuré avec une vitesse de coupe de 6 m/min et une avance de 6 $\mu\text{m}/\text{tour}$.

Le cuivre pur usiné avec une vitesse de coupe de 30m/min et une avance de 20 μm génère un bourrelet proche de celui observé par (Issahaq et al. 2022) lors de la coupe d'un aluminium 1100. Son épaisseur de copeau déformé est de l'ordre de 70 à 80 μm sur sa partie continue, mais le bourrelet s'épaissit progressivement jusqu'à une valeur supérieure à 300 μm , puis retrouve son épaisseur par une transition progressive. Le copeau de cuivre nanostructuré présente également des épaisseurs conséquentes avec une épaisseur maximum de 306 μm pour une avance de 6 $\mu\text{m}/\text{tour}$. Cependant, ce maximum atteint, l'épaisseur de copeau non déformé de 15 à 20 μm est retrouvé brutalement. L'intrados d'un copeau de cuivre pur pour une avance de 6 $\mu\text{m}/\text{tour}$ et une vitesse de coupe de 6 m/min, figure 3, met en évidence des zones de collages réduite et la présence de fissures, confirmant un mécanisme proposé par (Issahaq et al. 2022) ou le bourrelet apparaît comme un pli macroscopique initié par une zone collante en amont ; Pour les mêmes conditions opératoires dans le cuivre nanostructuré, une fissure est également présente mais dans le prolongement du changement brutale d'épaisseur. Le copeau est continu mais est proche d'une fragmentation. Le rôle du plomb n'est donc pas totalement remplacé mais la coupe est améliorée.

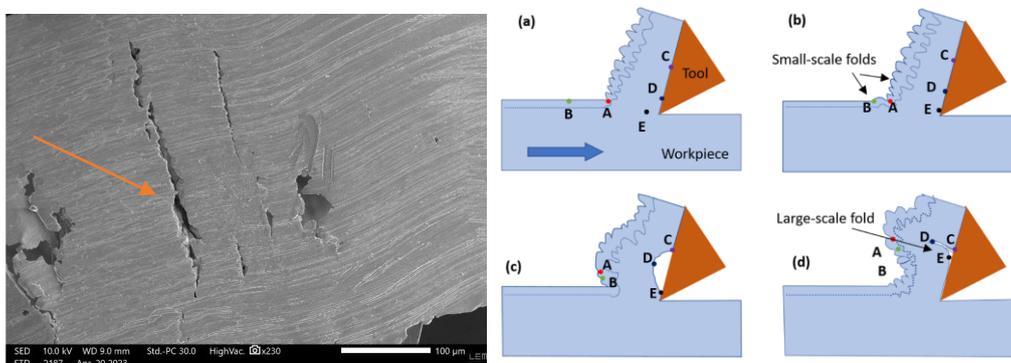


Figure 3: Intrados d'un copeau de cuivre pur, sous un bourrelet. mettant en évidence des zones de collages en amont d'une fissure et scenarii proposé par (Issahaq et al. 2022)

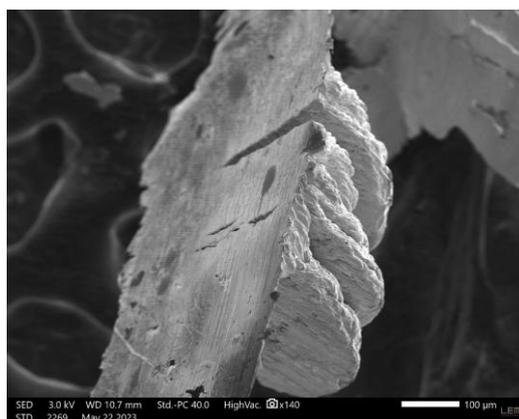


Figure 4: Intrados d'un copeau de cuivre nanostructure ECAE pour une vitesse de coupe de 6m/min une avance de 6 μ m/tour.

3.3 Microstructure

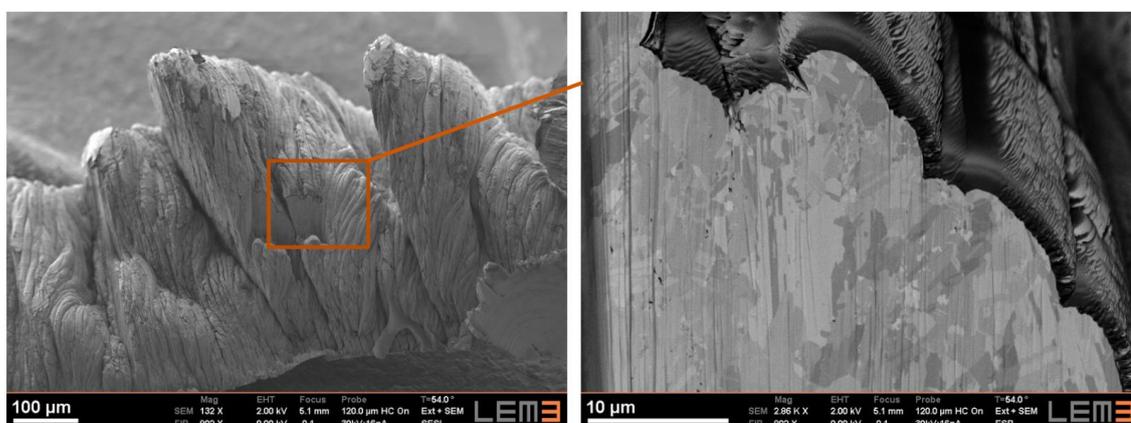


Figure 5: Evaluation de la microstructure dans un micro copeau de cuivre. La technologie FIB permet d'accéder à des informations non présentes dans la littérature à ces échelles.

Le copeau est un témoin du phénomène de coupe et son observation microstructurale est une technique avancée pour en comprendre les mécanismes. Lors de l'usinage à l'échelle macroscopique, il est proposé d'enrober les copeaux, de les polir et de procéder à leur observation par microscopie optique ou électronique (Nouari et Makich 2013). A l'échelle de la micro coupe, malgré une épaisseur du bourrelet de 300 μ m, le copeau continu est dans notre cas de 2 à 3 fois l'épaisseur de copeau non déformé. Sa manipulation en vue de sa préparation métallographique réduit les chances d'une observation des bandes de cisaillement et autres phénomènes de collage à l'intrados. La technologie FIB appliqué à l'observation de la microstructure dans le copeau est proposée Figure 5. Une coupe transversale très précise permet de révéler les grains présents. En chaque pli, il apparait des grains présentant des dimensions de l'ordre du micromètre. La structure initiale présentant une taille de grain plus faible, une recristallisation fine a eu lieu au sein des bourrelets synonymes de la présence d'une bande de cisaillement de l'ordre de 2 μ m d'épaisseur.

4 Conclusion et perspectives

Des essais de coupe orthogonale ont été menés pour des cuivres purs mais présentant deux tailles de grains différentes, un échantillon ayant subi une nano structuration par procédé ECAE.

Si l'usinage des cuivres purs reste difficile et ne permet pas en l'état d'envisager une simple suppression du plomb pour son décolletage à l'échelle industrielle, l'état nanostructuré permet de réduire sensiblement les efforts de coupe. En particulier aux plus faibles avances lorsque l'épaisseur de copeau non déformé est proche du rayon d'acuité d'arête, les efforts sont réduits de l'ordre de 50%.

Pour les deux états, les copeaux obtenus présentent des bourrelets importants avec des épaisseurs en certains points supérieures à 300 μ m, l'épaisseur de copeau non déformé étant au maximum de 20 μ m. Les faciès sont cependant différents avec une fragmentation du bourrelet pour le cuivre ECAE quand le cuivre pur génère un bourrelet par une accumulation de matière et de plis, lié à un collage dans la partie supérieure de la face de coupe.

La technologie FIB permet d'observer finement les grains dans le copeau micrométrique. Cette technologie permet d'envisager une compréhension avancée des phénomènes thermomécaniques présent lors de la coupe en particulier lorsque les copeaux obtenus ont une épaisseur de l'ordre du micromètre.

Remerciements

Nous remercions Andréa Capella pour l'utilisation du MEB atmosphérique de la plateforme Procédés et Julien Guyon pour l'utilisation du FIB, plateforme Micromat du LEM3.

Références

- Balázs, Barnabás Zoltán, Norbert Geier, Márton Takács, et J. Paulo Davim. 2021. « A Review on Micro-Milling: Recent Advances and Future Trends ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 112 (3- 4): 655- 84. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06445-w>.
- D'Acunto, Alain, Gael Le Coz, Abdelhadi Moufki, et Daniel Dudzinski. 2015. « Dry milling of nanostructured, workpiece surface integrity ». In *XIIth International Conference on High Speed Machining (HSM2015)*. Nanjing, China. <https://hal.science/hal-01513143>.
- Dalla Torre, F., R. Lapovok, J. Sandlin, P. F. Thomson, C. H. J. Davies, et E. V. Pereloma. 2004. « Microstructures and properties of copper processed by equal channel angular extrusion for 1–16 passes ». *Acta Materialia* 52 (16): 4819- 32. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.06.040>.
- Ding, X., A. E. W. Jarfors, G. C. Lim, K. C. Shaw, Y. C. Liu, et L. J. Tang. 2012. « A study of the cutting performance of poly-crystalline oxygen free copper with single crystalline diamond micro-tools ». *Precision Engineering* 36 (1): 141- 52. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.09.001>.
- Ding, X., et M. Rahman. 2012. « A study of the performance of cutting polycrystalline Al 6061 T6 with single crystalline diamond micro-tools ». *Precision Engineering* 36 (4): 593- 603. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.04.009>.
- Directive déléguée (UE) 2023/544. 2022. *OJ L*. Vol. 073. http://data.europa.eu/eli/dir_del/2023/544/oj/fra.
- Issahaq, Mohammed Naziru, Anirudh Udupa, Mojib Saei, Debapriya Pinaki Mohanty, James B. Mann, Narayan K. Sundaram, Kevin P. Trumble, et Srinivasan Chandrasekar. 2022. « Dual-scale folding in cutting of commercially pure aluminum alloys ». *International Journal of Machine*

- Tools and Manufacture 181 (octobre): 103932.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103932>.
- Johansson, Jakob, Per Alm, Rachid M'Saoubi, Per Malmberg, Jan-Eric Ståhl, et Volodymyr Bushlya. 2022. « On the Function of Lead (Pb) in Machining Brass Alloys ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 120 (11): 7263- 75. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09205-0>.
- Le Coz, Gaël, Laurent Peltier, Romain Piquard, Pascal Laheurte, et Alain D'Acunto. 2022. « Machinability of TiNb bio-compatible alloys ». *Procedia CIRP, V CIRP Conference on BioManufacturing*, 110 (janvier): 59- 63. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.06.013>.
- Nobel, Christoph, Fritz Klocke, Dieter Lung, et Sebastian Wolf. 2014. « Machinability Enhancement of Lead-free Brass Alloys ». *Procedia CIRP, 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014*, 14 (janvier): 95- 100. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.018>.
- Nouari, M., et H. Makich. 2013. « Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti-6Al-4V and Ti-555 ». *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 41 (novembre): 259- 69. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.04.011>.
- Piquard, Romain. 2016. « Expérimentation et modélisation de la micro-coupe pour une application au micro-fraisage ». *These de doctorat, Besançon*. <https://www.theses.fr/2016BESA2082>.
- Piquard, Romain., Thibaud, Sebastien., D'Acunto, Alain., Fontaine, Mikael., & Dudzinski, Daniel. 2017. Phenomenological modelling of micro-cutting based on experimental results. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 3429-3436. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9047-9>
- Schultheiss, Fredrik, Daniel Johansson, Volodymyr Bushlya, Jinming Zhou, Kent Nilsson, et Jan-Eric Ståhl. 2017. « Comparative study on the machinability of lead-free brass ». *Journal of Cleaner Production* 149 (avril): 366- 77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.098>.
- Weinert, K., et V. Petzoldt. 2008. « Machining NiTi micro-parts by micro-milling ». *Materials Science and Engineering: A, Proceedings of the 7th European Symposium on Martensitic Transformations, ESOMAT 2006*, 481- 482 (mai): 672- 75. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.220>.
- Yang, Kai, Ying-chun Liang, Kang-ning Zheng, Qing-shun Bai, et Wan-qun Chen. 2011. « Tool Edge Radius Effect on Cutting Temperature in Micro-End-Milling Process ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 52 (9): 905- 12. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2795-z>.