

ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU CUIVRE MALAXÉ

G. B. Rodrigues^{1(*)}, Y. Gaillard², P-H. Cornuault², C. Langlade^{1,3}

1 : Université Marie et Louis Pasteur, UTBM, CNRS, Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne ICB UMR 6303, 90010 Belfort cedex, France

2 : Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France

3 : Université Bourgogne Europe, CNRS, Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne ICB UMR 6303, 21000 Dijon, France

(*) guilherme.bernardes@femto-st.fr

Mots-Clés – Zone malaxée, Cuivre, Gradient de dureté.

RESUME

Dans différents secteurs industriels, il est souvent observé qu'en service, les composants mécaniques subissent des efforts, notamment en *fretting*, qui conduisent à la formation d'une couche appelée Transformation Tribologique de Surface (ou TTS, *Tribologically Transformed Structure*) [1-3]. Cette couche se caractérise par une modification superficielle marquée de la microstructure, notamment due un raffinement significatif des grains, entraînant une augmentation de la dureté [2]. Si cette transformation peut poser problème dans certaines applications, elle peut également être avantageuse dans d'autres contextes. Parallèlement, des études ont montré que le traitement par malaxage, une variante du soudage par friction (*Friction Stir Processing*, FSP), est également capable de générer des microstructures similaires à celles observées dans les TTS. Ce procédé, qui repose sur une combinaison d'échauffement frictionnel et de forte déformation plastique, peut modifier considérablement la microstructure du matériau [4]. Toutefois, cette modification n'est généralement pas homogène en profondeur. On observe en effet la formation de différentes zones, comme illustré dans la Figure 1(a) : i) la zone malaxée (ZM), présentant une microstructure ultrafine et recristallisée ; ii) la zone thermo-mécaniquement affectée (ZTMA), ou zone de transition ; iii) et la zone thermiquement affectée (ZTA), qui n'est pas plastiquement déformée, mais peut subir une modification de ses propriétés en raison de l'échauffement. Dans ce contexte, cette étude a pour objectif d'évaluer si ce gradient microstructural se traduit également par un gradient des propriétés mécaniques du matériau, en particulier la dureté et le module d'élasticité, lorsque l'on s'éloigne de la surface malaxée [4].

Des échantillons de cuivre sont malaxés à l'aide d'un outil cylindrique en carbure de tungstène de 10 mm de diamètre, muni d'un pion terminal de base carrée (9 mm²) et de 0,3 mm de hauteur. Après le malaxé, les échantillons sont découpés, puis leurs sections transversales polies. Les changements microstructuraux sont évalués par microscopie optique et électronique. En particulier, l'EBSD est utilisé pour évaluer l'évolution de la taille des grains et leurs orientations. Enfin, des mesures de dureté ont été réalisées à l'aide d'un nanoindenteur UNHT (Anton Paar), équipé d'un indenteur Berkovich. Un total de 125 indentations ont été effectuées selon une matrice de 25 x 5 points, s'étendant depuis le bord de la surface malaxée jusqu'à une distance de 125 µm. En parallèle, une matrice similaire a été réalisée sur le même échantillon, mais dans une région non malaxée (voir Figure 1(a)).

Les Figures 1(b) et 1(c) présentent les résultats obtenus pour les deux matrices de mesure, concernant respectivement le module d'élasticité et la dureté. Il est possible d'observer que le procédé de malaxage n'a pas d'effet significatif sur le module d'élasticité du cuivre, les valeurs mesurées restant similaires dans les deux régions, malaxée et non malaxée. En revanche, le traitement de malaxage a modifié la dureté du matériau, en particulier dans la zone proche de la surface malaxée. Une dureté d'environ 1950 MPa est observée dans la zone malaxée, contre environ 1550 MPa dans la région non malaxée, soit une augmentation relative d'environ 25 %. En s'éloignant de la surface, la dureté

diminue progressivement pour atteindre des valeurs proches de celles du cuivre non malaxé à partir d'environ 60 μm de profondeur. Ce gradient de dureté s'explique par l'évolution progressive de la microstructure à travers les différentes zones mentionnées précédemment.

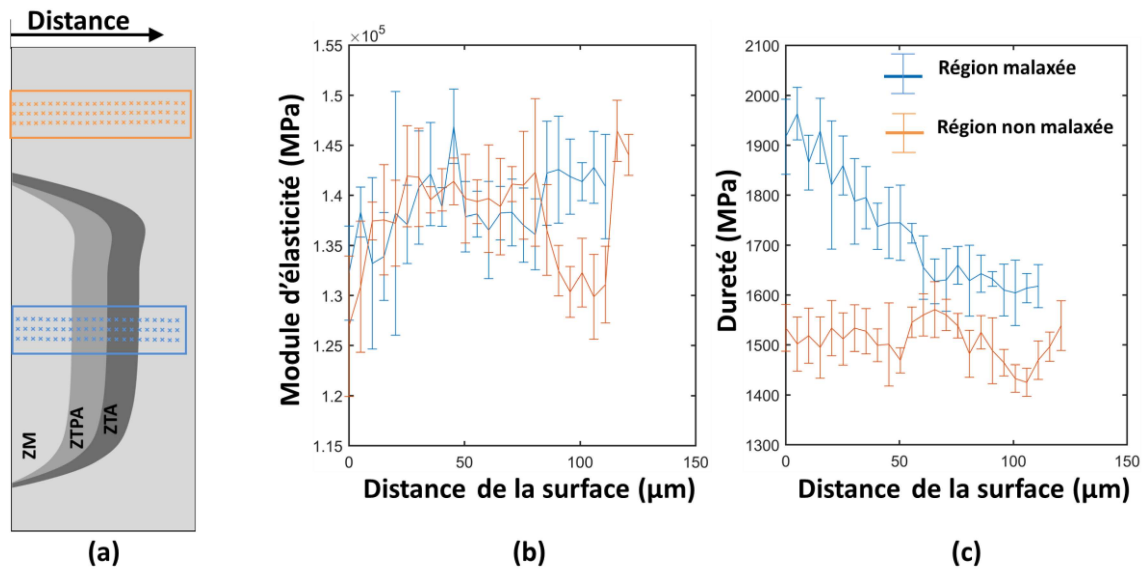


Figure 1 – (a) Représentation des différentes zones formées après le traitement de malaxage, avec les matrices de nanoindentations réalisées dans une région malaxée et une région non malaxée. Les résultats correspondants des nanoindentations sont présentés pour : (b) le module d'élasticité et (c) la dureté.

Remerciements

Ce travail a été en partie soutenu par l'EIPHI Graduate School (contrat ANR-17-EURE-0002), et par les installations technologiques du Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne ICB UMR 6303 à Sevenans et l'institut FEMTO-ST à Besançon.

Références

- [1] Sauger, E., Fouvry, S., Ponsonnet, L., Kapsa, P., Martin, J. M., & Vincent, L. (2000). Tribologically transformed structure in fretting. *Wear*, 245(1-2), 39-52. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00464-6.
- [2] Lefranc, V., Gandiolle, C., Vallet, M., Bourgon, J., Hérupré, E., Fouvry, S., & Aubin, V. (2025). Scenario for the formation of fretting obtained TTS in TA6V from detailed microstructural analysis. *Wear*, 205834. DOI: 10.1016/j.wear.2025.205834.
- [3] Sauger, E., Ponsonnet, L., Martin, J. M., & Vincent, L. (2000). Study of the tribologically transformed structure created during fretting tests. *Tribology International*, 33(11), 743-750.
- [4] Węglowski, M. S. (2018). Friction stir processing – State of the art. *Archives Civil Mech. Eng.*, 18(1), 114-129. DOI: 10.1016/j.acme.2017.06.002.