

EFFET DU TRAITEMENT DE MALAXAGE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET TRIBOLOGIQUES DES MÉTAUX

G. B. Rodrigues¹, Y. Gaillard², P-H. Cornuault², C. Langlade^{1,3}

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

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

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

MOTS CLES

Zone malaxée, Nanoindentation, Frottement.

INTRODUCTION

Ces dernières décennies, l'aérospatiale et l'automobile explorent des matériaux présentant de meilleurs rapports propriétés mécaniques/masse volumique, favorisant l'aluminium, le cuivre, le titane et leurs alliages comme alternatives à l'acier [1]. Une stratégie clé consiste à modifier leur surface pour améliorer les résistances mécaniques, à la corrosion et à l'usure. Parmi des différentes techniques, le traitement par malaxage (Friction Stir Processing – FSP), variante du soudage par friction, permet de modifier la surface ou de créer des surfaces composites à l'état solide [2]. Il génère un considérable échauffement et une forte déformation plastique [3] qui modifie drastiquement les propriétés localement, offrant en même temps un faible coût, une grande efficacité énergétique et un impact environnemental réduit, faisant de lui une technologie prometteuse [2].

Le traitement par malaxage modifie profondément la microstructure du matériau par recristallisation et affinage des grains. Trois zones se forment (Figure 1(a)) : la zone malaxée (ZM), à microstructure ultrafine recristallisée ; la zone thermo-mécaniquement affectée (ZTMA), ou zone de transition ; et la zone thermiquement affectée (ZTA), sans déformation plastique mais avec une possible modification des propriétés [3].

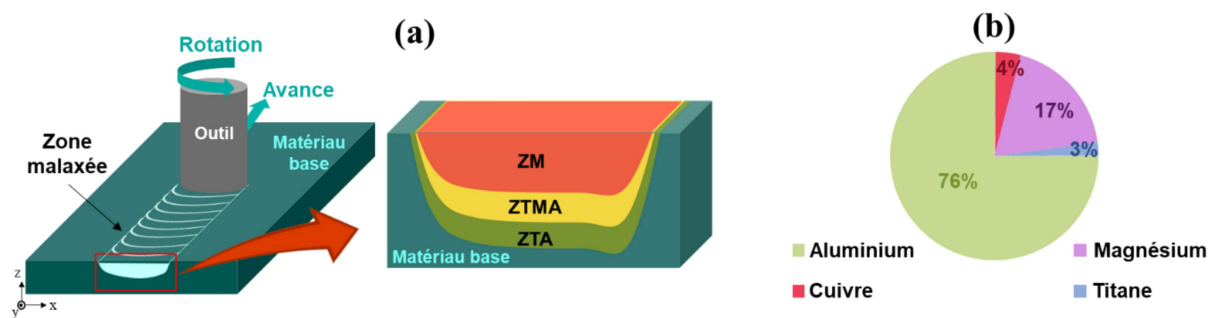


Figure 1 : (a) Schéma illustrant le traitement de malaxage et les trois zones formées dans la microstructure du matériau (adaptée de [4]) et (b) Identification des matériaux de la littérature (adaptée de [2]).

Bhojak et al. [2] rapportent que 76 % des études sur le traitement par malaxage (entre 2011-2020) concernent les alliages d'aluminium (Figure 1(b)). Cependant, la réponse tribologique de ces matériaux reste peu explorée malgré les modifications induites en surface. Ding et al. [4] signalent une réduction des efforts de frottement pour un alliage de titane, tandis qu'une autre étude [5] observe une diminution du coefficient de frottement et de l'usure du titane pur selon le nombre de passes réalisées par l'outil.

Dans ce contexte, ce travail vise à étudier l'influence des paramètres du traitement de malaxage sur la microstructure, les propriétés mécaniques, et le comportement tribologique. De plus, l'éventuel

gradient des propriétés mécaniques est analysé par nanoindentation, permettant une évaluation locale des effets du procédé.

METHODE EXPERIMENTALE

Un outil cylindrique en carbure de tungstène, de 10 mm de diamètre, comportant un pion terminal de base carrée de 9 mm² et de 0,3 mm de hauteur a été utilisé. Le Tableau 1 présente les paramètres de malaxage évalués durant le procédé. Après traitement, les échantillons sont découpés pour permettre l'analyse de leurs sections transversales.

Tableau 1 : Paramètres de malaxage évalués.

Paramètre	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Nombre de passes	1	4	---
Vitesse de rotation (rpm)	630	1200	1600
Vitesse d'avance (mm/min)	40	200	315
Profondeur de passe (mm)	0,05	0,10	0,15

Des techniques conventionnelles telles que la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage (avec EDS et EBSD) sont utilisées pour analyser la microstructure, la composition et la répartition des éléments après malaxage. L'EBSD permet également une analyse quantitative des grains et de leur orientation. Des analyses en DRX permettent d'identifier les phases présentes dans les différentes zones et d'évaluer la taille et orientation des cristallites après traitement. Enfin, une matrice de nanoindents permet de déterminer le module d'élasticité et la dureté des échantillons, offrant ainsi une analyse du gradient des propriétés mécaniques dans les différentes zones affectées.

Un tribomètre bille-plan, conçu en interne, est utilisé pour l'étude du comportement tribologique. Une bille en Si₃N₄ de 5 mm de diamètre est utilisée comme contreface sur la surface malaxée, avec un mouvement relatif alternatif linéaire à 1 Hz, et une force normale constante de 1 N est appliquée sur le contact via une masse morte. Au cours des essais, un capteur piézoélectrique mesure la force tangentielle F_T et capteur LVDT enregistre le déplacement relatif h de la bille sur l'échantillon plan de manière à analyser ultérieurement les cycles de frottement $F_T(h)$. Une caractérisation de la morphologie des traces de frottement est réalisée après essais, permettant de mieux comprendre le comportement tribologique des surfaces malaxées.

Cette étude met donc en évidence la possibilité d'optimiser les paramètres de malaxage afin d'adapter les propriétés mécaniques et tribologiques des surfaces, élargissant ainsi l'application de cette technique à des matériaux encore peu explorés dans la littérature.

Références

- [1] Jain, V., Mishra, R. S., Verma, R., Essadiqi, E. (2013). Superplasticity and microstructural stability in a Mg alloy processed by hot rolling and friction stir processing, *Scr. Mater.*, 68(7), 447-450. DOI 10.1016/j.scriptamat.2012.11.009.
- [2] Bhojak, V., Jain, J. K., Saxena, K. K., Singh, B., Mohammed, K. A. (2023). Friction stir process: a comprehensive review on material and methodology. *Ind. J. Eng. Mater. Sci. (IJEMS)*, 30 (1), 45-64. DOI: 10.56042/ijems.v1i1.61877.
- [3] 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.
- [4] Ding, Z., Fan, Q., Wang, L. (2019). A review on friction stir processing of titanium alloy: characterization, method, microstructure, properties. *Metall. Mater. Trans. B*, 50, 2134-2162. DOI 10.1007/s11663-019-01634-9.
- [5] Vakili-Azghandi, M., Roknian, M., Szpunar, J. A., Mousavizade, S. M. (2020). Surface modification of pure titanium via friction stir processing: Microstructure evolution and dry sliding wear performance. *J. Alloys Compd.*, 816. DOI: 152557.10.1016/j.jallcom.2019.152557.