

Les joints de grains de torsion basale dans les alliages de Ti: une problématique d'amorçage ou de propagation de fissure?

T. Yvinec¹, V. Valle¹, F. Hamon¹, D. Iabadden², J. Guénolé² et S. Hemery^{1,a}

¹ Institut Pprime, ISAE-ENSMA, Université de Poitiers, CNRS UPR 3346, France

² CNRS, Université de Lorraine, Arts et Métiers Institute of Technology, LEM3, Metz, France

Points d'intérêt.

- Des facettes lisses sont observées aux sites d'amorçage surfaciques et correspondent à des joints de grains de torsion basale
- Les champs de déformation ont été caractérisés par HR-DIC au voisinage de ces configurations de microstructure
- Une modélisation basée sur le critère de Griffith est proposée pour expliquer la formation des facettes

1 Introduction

Les alliages de titane sont largement utilisés dans l'industrie aéronautique, notamment pour leur excellente résistance spécifique à la fatigue [1]. En particulier, l'alliage Ti-6Al-4V, aussi appelé TA6V, est le plus couramment employé. Son comportement en fatigue a fait l'objet d'un grand nombre d'études visant à clarifier les relations existantes entre les caractéristiques de sa microstructure et ses propriétés [2]. Malgré ces travaux, l'identification des mécanismes contrôlant l'amorçage et la propagation des fissures reste un enjeu important pour lever l'empirisme des capacités de prédiction actuelles et prendre en compte des chargements non-périodiques, ou l'inévitable hétérogénéité de microstructure à l'échelle des composants industriels.

Les études antérieures ont généralement montré la présence de facettes aux sites d'amorçage des fissures [3,4]. Ces facettes, souvent associées à un mécanisme de quasi-clivage, sont orientées selon un plan basal de la maille hexagonale compacte du titane α . En particulier, celles-ci correspondent aux nodules des microstructures bimodales. A partir de l'étude de leur orientation par rapport au chargement, il a été conclu que l'état de contrainte requis pour la formation d'une fissure est associé à des composantes de contrainte normales et de cisaillement élevées sur la facette [3,5]. Toutefois, le rôle de cet état mécanique dans les mécanismes d'amorçage des fissures reste mal compris, bien qu'analogue aux critères tels que proposés par Fatemi et Socie par exemple [6]. On peut noter que la formation de bandes de glissement persistantes, souvent considérées comme à l'origine des fissures dans les métaux, est généralement contrôlée par le mouvement des dislocations sous l'effet d'une cisssion résolue [7]. Cette apparente contradiction est à l'origine des motivations de la présente étude. En particulier des travaux récents ont montré que ces facettes résultent de la fissuration de joints de grains spécifiques, dits de torsion basale [8].

2 Résultats et discussions

Dans ces travaux, on s'intéresse à un alliage Ti-6Al-4V à microstructure bimodale constituée de nodules et de lamelles de phase α dans une matrice de phase β résiduelle. Les événements de déformation et d'amorçage de fissures ont été caractérisés à l'échelle de la microstructure afin d'identifier les mécanismes sous-jacents. Dans un premier temps, et afin de localiser des sites potentiels d'amorçage de fissures, la surface des éprouvettes a été cartographiée par la technique EBSD et les données ont été traitées avec un programme spécifique pour identifier les joints de grains de torsion basale [9]. Ensuite, un mouchetis a été déposé par remodelage d'un film d'or sous vapeur d'eau. Des micrographies ont été acquises avant et au cours d'essais mécaniques afin d'accéder à des données quantitatives sur les événements de déformation et l'amorçage des fissures, par corrélation d'images numériques à haute résolution spatiale (HR-DIC).

^a Auteur assurant la présentation : samuel.hemery@ensma.fr

Deux types d'essais mécaniques ont été mis en œuvre :

- Un essai cyclique de chargements – déchargements succesifs à différents niveaux de contrainte maximale a été réalisé in-situ dans un microscope électronique à balayage.

Ce premier essai a permis de comparer les caractéristiques des événements de déformation aux joints de grains de torsion basale avec celles des événements de glissement intragranulaire plus conventionnels. En particulier, une activité plastique précoce, c'est-à-dire apparaissant à faible niveau de contrainte macroscopique, est mise en évidence. De plus, un mouvement inverse plus marqué est observé aux joints de grains étudiés par rapport aux événements de plasticité intragranulaires. Ces caractéristiques révèlent un comportement singulier de ces configurations microstructurales.

- Des essais de fatigue à différents rapports de charge ont été interrompus périodiquement afin de suivre ex situ l'évolution des champs cinématiques en surface de l'éprouvette.

Ces essais ont permis de visualiser la transition d'un événement de déformation observé aux premiers cycles de chargement, jusqu'à la formation d'une fissure de fatigue s'étendant le long du joint de grain considéré. On note une augmentation du déplacement mesuré le long du joint de grain avec le nombre de cycles. Enfin, les observations ne montrent ni formation d'extrusion au cours du cyclage, ni croissance progressive de la fissure le long du joint de grain. En revanche, une extrusion est observée dans les éléments de microstructure voisins, laquelle précède la fissuration du joint de grain.

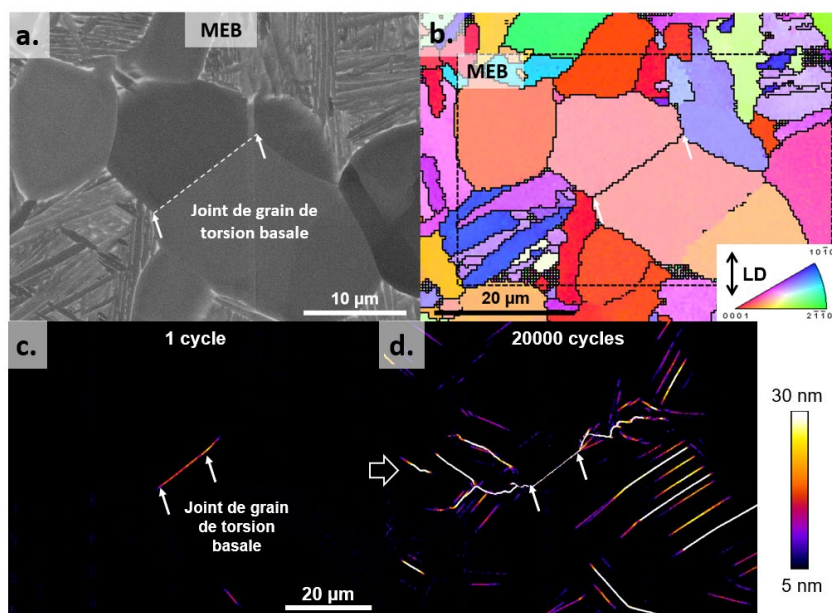


Figure 1. a. Micrographie MEB montrant un joint de grain de torsion basale et la microstructure environnante, b. Cartographie EBSD illustrant la direction cristalline parallèle à la direction de chargement (LD), c. et d. Amplitude de déplacement mesuré par HR-DIC au cours d'un essai de fatigue interrompu.

Les observations expérimentales suggèrent qu'un endommagement précoce a lieu hors du joint de grain associé à la formation de la facette, en lien avec le comportement spécifique noté précédemment. Cette pré-fissure favoriserait ensuite le clivage du joint de grain selon un mécanisme tel que proposé par Griffith [10]. Des calculs des grandeurs nécessaires à l'estimation des niveaux de contrainte et des caractéristiques de pré-fissuration, telles que les énergies de surface, ont été effectués par dynamique moléculaire pour un alliage Ti-6Al. L'application du critère de Griffith suggère que les joints de grain de torsion basale, qui conduisent à la formation des facettes souvent associées à la phase d'amorçage, joueraient en réalité un rôle déterminant dans une étape de propagation rapide des fissures par clivage du joint de grain.

Références

- [1] J.C. Williams, E.A. Starke, *Acta Mater.* 51 (2003) 5775–5799.
- [2] J.A. Hall, *Int. J. Fatigue* 19 (1997) 23–37.

- [3] F. Bridier, P. Villechaise, J. Mendez, *Acta Mater.* 56 (2008) 3951–3962.
- [4] A.L. Pilchak, J.C. Williams, *Metall. Mater. Trans. A* 42 (2011) 1000–1027.
- [5] I. Bantounas, T.C. Lindley, D. Rugg, D. Dye, *Acta Mater.* 55 (2007) 5655–5665.
- [6] A. Fatemi, D.F. Socie, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 11 (1988) 149–165.
- [7] H. Mughrabi, *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 373 (2015) 20140132.
- [8] C. Lavogiez, S. Hémery, P. Villechaise, *Scr. Mater.* 183 (2020) 117–121.
- [9] C. Bean, J.C. Stinville, A. Naït-Ali, Z. Wu, F. Sun, F. Prima, S. Hemery, *Int. J. Fatigue* (2023) 107854.
- [10] A.A. Griffith, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Contain. Pap. Math. Phys. Character* 221 (1921) 163–198.