

Etude des mécanismes de fatigue des structures cellulaires en alliage de titane élaborées par fabrication additive

**T. Persenot^a, J-Y. Buffière^a, R. Dendievel^b, E. Maire^a,
G.Martin^b**

a. INSA-Lyon, MATEIS, CNRS UMR 5510, 69621 Villeurbanne, France

b. Université Grenoble Alpes, SIMAP, F-38000 Grenoble, France

theo.persenot@insa-lyon.fr ; jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr ; remy.dendievel@simap.grenoble-inp.fr ; eric.maire@insa-lyon.fr ; guilhem.martin@simap.grenoble-inp.fr ;

Résumé

L'objet de cette thèse est d'étudier les performances et le comportement en fatigue de l'alliage Ti-6Al-4V élaboré par fabrication additive par faisceau d'électrons (EBM : Electron Beam Melting). Les mécanismes de fatigue sont dans un premier temps identifiés à partir d'essais de fatigue réalisés sur des éprouvettes massives brutes de fabrication. Ces échantillons ont auparavant été caractérisés par tomographie rayons X, MEB et EBSD. Les mécanismes de fatigue sont ensuite analysés en considérant les mécanismes de rupture, les défauts internes, les aspects de surface, la microstructure ainsi que les paramètres de fabrication. L'effet de différents post-traitements sur les performances en fatigue a ensuite été évalué.

Enfin, des essais de fatigue similaires seront menés sur des structures cellulaires. Les résultats obtenus seront alors étudiés en se basant sur les mécanismes identifiés précédemment sur les échantillons massifs.

Mots clés : fabrication additive ; Electron Beam Melting ; fatigue ; structures cellulaires ; Ti-6Al-4V ; tomographie rayon X...

1. Introduction

Aujourd'hui, la réduction des consommations énergétiques est devenu un point crucial pour la majorité des industries et plus particulièrement pour les industries du transport. Pour l'industrie aéronautique, cela passe entre autres par des réductions de masse. C'est dans ce contexte que les structures cellulaires s'avèrent être une des solutions les plus propices et efficaces. Le principal frein à l'utilisation de ces solutions jusqu'à maintenant était leur géométrie complexe qui rendait leur production difficile et coûteuse. Néanmoins, grâce à l'avènement de la fabrication additive, ce dernier obstacle a été levé et leur essor peut commencer une fois que leurs propriétés mécaniques et en fatigue seront connues et maîtrisées.

C'est sur ce dernier point que se focalise le travail de cette thèse à savoir le comportement en fatigue de structures cellulaires élaborées en alliage de titane (Ti-6Al-4V) par fabrication additive (fusion par faisceau d'électrons).

2. Présentation du travail réalisé

La stratégie de travail s'oriente autour de deux grands axes. Il s'agit dans un premier temps d'identifier le comportement en fatigue du matériau constitutif résultant d'une fabrication par EBM (Electron Beam Melting). Des éprouvettes massives représentatives des poutres qui constituent les structures cellulaires ont été conçues. Elles servent à déterminer les performances en fatigue du matériau ainsi que les mécanismes qui gouvernent sa rupture. La méthodologie de travail est alors la suivante :

1. Tomographie par rayon X des éprouvettes
2. Essai de fatigue jusqu'à rupture
3. Tomographie après rupture
4. Observation MEB (Microscope Electronique à Balayage) des faciès de rupture

On peut de cette manière remonter assez précisément au(x) défaut(s) ayant généré la rupture. Une fois ces défauts critiques identifiés, différents post-traitements ou modifications du processus de fabrication sont à étudier afin d'améliorer les performances du matériau. Le but étant ensuite de transférer ce travail sur les structures cellulaires, il est nécessaire que tous les post-traitements soient reproductibles sur ces structures. C'est pourquoi tout usinage de surface a été proscrit.



Figure 1 : Eprouvette massive

Dès lors que les mécanismes de rupture sont identifiés et les performances améliorées sur le matériau constitutif, on peut effectuer le même travail sur les structures cellulaires. Il s'agit dans ce cas d'analyser comment la structure influe sur les mécanismes de rupture.

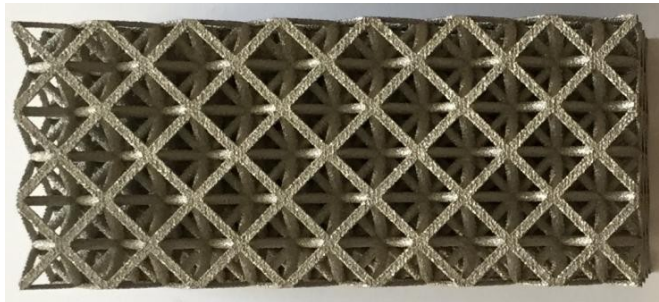


Figure 2 : Structure cellulaire

Le travail effectué jusqu'à présent s'est focalisé sur le comportement du matériau constitutif produit par EBM. Ce procédé de fabrication additive repose sur la fusion sélective sous vide par faisceau d'électrons d'un lit de poudre.

En dehors des paramètres propres à la fabrication (vitesse et taille du faisceau, stratégie de fusion,), d'autres paramètres entrent en jeu lors de cette dernière tels que l'orientation par rapport à la direction de fabrication ou le diamètre de l'éprouvette. Afin de vérifier leur impact sur les performances en fatigue, deux orientations de fabrication (0° et 45° par rapport à la direction de fabrication) et deux diamètres seront utilisés (2mm et 4mm dans la section constante). Le reste des paramètres de fabrication sera constant. La composition de la poudre ayant elle aussi un impact sur les propriétés mécaniques, deux jeux de poudres avec des taux d'oxygène différents ont été utilisés.

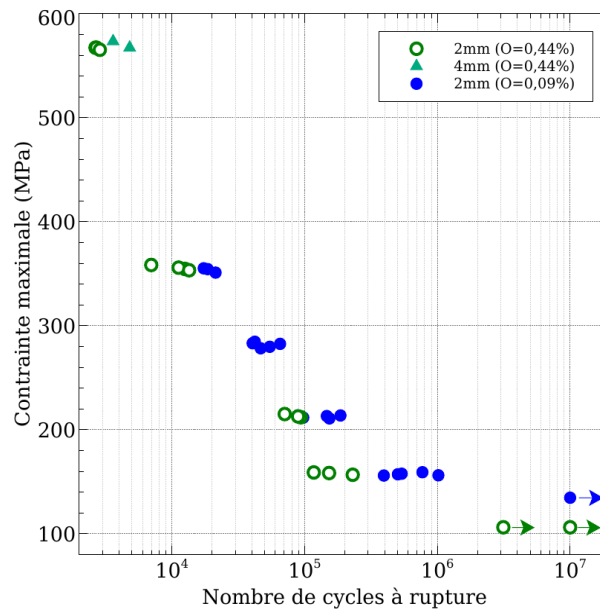


Figure 3 : Résultats des essais de fatigue

Les premiers essais de fatigue (figure 3) ont tous été réalisés sur des éprouvettes fabriquées verticalement (0°) et la plupart ont un diamètre de 2mm dans la zone utile à section constante. Ces essais valident l'impact néfaste de l'oxygène sur les propriétés en fatigue (un facteur 5 sur la concentration d'O divise les durées de vie par 3 en moyenne). Les deux essais réalisés sur des éprouvettes ayant un diamètre plus important (4mm) montrent quant à eux l'effet bénéfique de l'augmentation du diamètre (durée de vie multipliée par 2).

Outre ces performances brutes, le travail s'est concentré autour de la cause de la rupture. A partir des images issues de la tomographie, on a abordé la prédiction de la zone de rupture en considérant de manière couplée les sections et défauts internes critiques. Il ressort de cette analyse que la rupture est plutôt dirigée par la taille de la section que par les défauts internes et que ceux-ci sont de seconde importance.

Par ailleurs, des observations au MEB des faciès de rupture ont permis d'identifier les zones de propagation de fissure et de rupture brutale ainsi que les défauts responsables de l'amorçage de la fissuration. En recoupant ensuite les tomographies faites avant et après rupture, il est possible d'en extraire le défaut critique à son état initial (figure 4). On observe alors que dans la plupart des cas, l'amorçage se fait sur un défaut de surface à la morphologie proche d'une fissure à savoir un défaut très fin et profond et donc générateur de concentrations de contraintes.

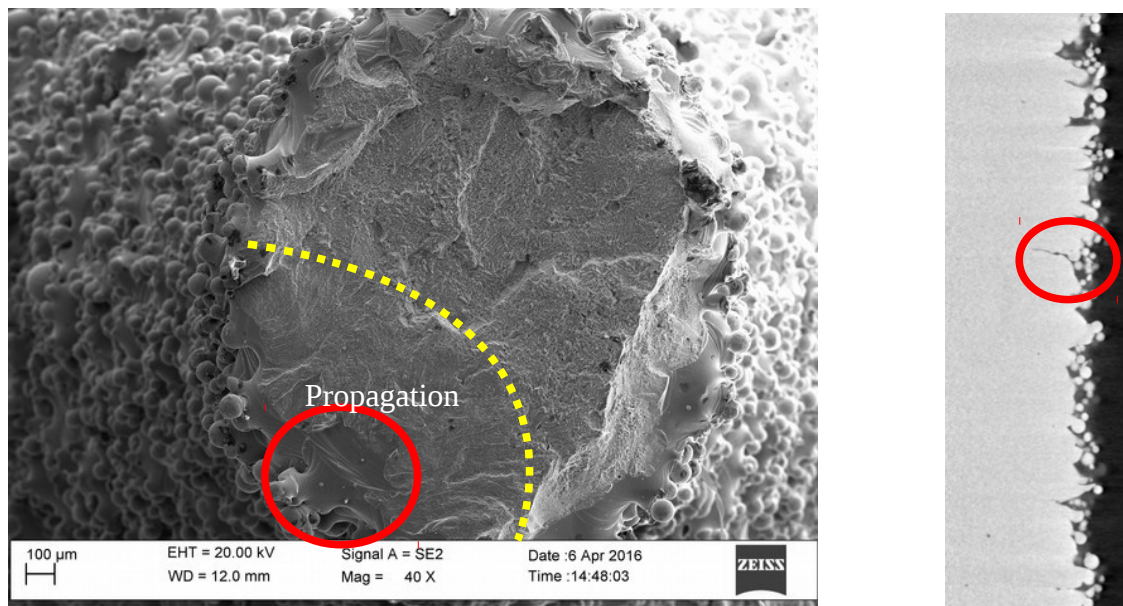


Figure 4 : Faciès de rupture et coupe tomographique

Plus que les pores internes ou la rugosité de la surface, il est donc primordial de supprimer ces fissures de fabrication afin d'améliorer l'état de surface. Pour cela, nous avons réalisé des attaques chimiques sur certains échantillons. La composition de la solution employée est la suivante (2 % HF, 8 %, HNO₃, H₂O) et les éprouvettes ont subi l'attaque chimique à température ambiante pendant 30 minutes. L'effet sur l'état de surface est facilement visible par tomographie (figure 5) et les performances en fatigue en sont améliorées (figure 5). Concernant les résultats en fatigue, les durées de vie sont au minimum améliorées d'un facteur 3 mais la dispersion l'est aussi. Cette augmentation de la dispersion est liée à l'hétérogénéité des états de surface entre les échantillons. En effet, la durée de l'attaque n'est pas suffisante pour faire disparaître les défauts les plus profonds. Et c'est ce qui provoque cette dispersion entre les échantillons où ces défauts sont encore présents et les autres. Il est d'ailleurs intéressant de noter que l'amorçage a encore lieu en surface.

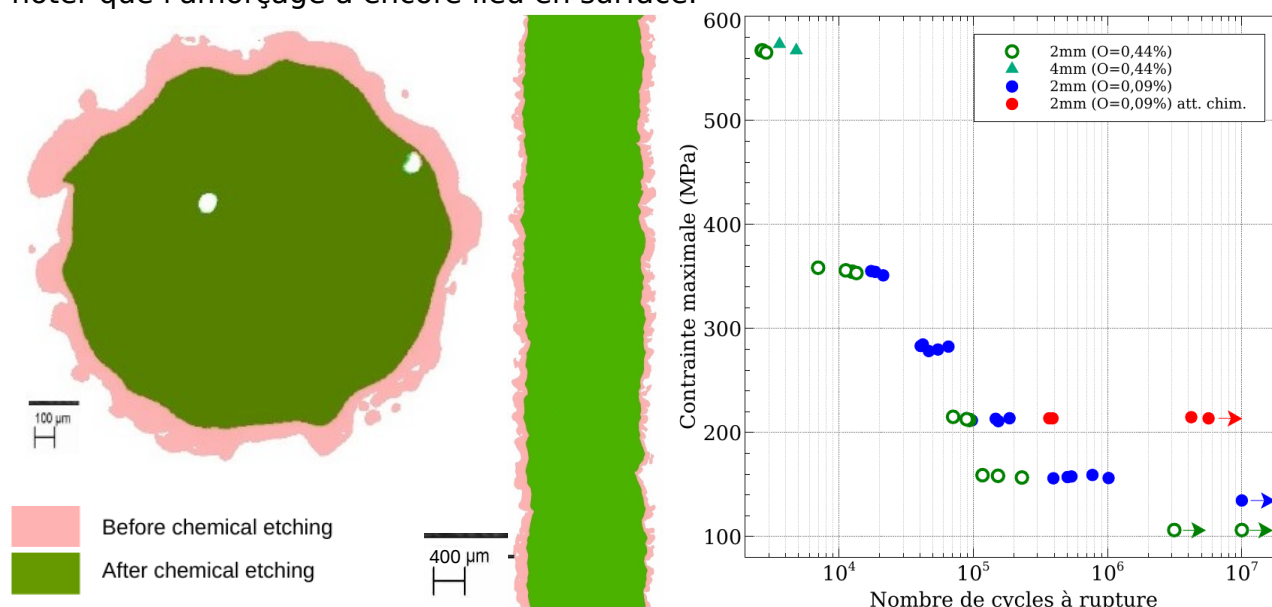


Figure 5 : Effet de l'attaque chimique sur l'état de surface et les résultats en fatigue

3. Conclusion

Les premiers essais de fatigue font état de propriétés à l'état brut assez faibles. Cela s'explique par un état de surface très rugueux et la présence de défauts internes. L'analyse de la rupture identifie les défauts de surface comme les plus critiques. De ce fait, un traitement de surface par attaque chimique a été réalisé. Il s'avère assez efficace mais reste à optimiser (augmentation de la durée) et à comparer avec d'autres solutions. Par ailleurs, les défauts internes (bulles de gaz et défauts de fusion) sont encore présents et doivent être considérés. Par conséquent, la suite du travail s'axera autour des améliorations de l'état de surface, de la réduction de la porosité par des traitements mais aussi une optimisation des paramètres de fabrication. Ensuite, le travail se poursuivra sur les structures cellulaires.