

# Augmentation de la durée de vie des pièces en titane issues de la fabrication additive

Cyril Ramseier, Siddhartha Berns, Eric Boillat, Randoald Müller

(Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, HEIG-VD, HES-SO)

Pierre-Antoine Gay, Oksana Banakh (Haute Ecole Arc Ingénierie, HES-SO)

La présence de défauts surfaciques (rugosité et fissures) ou internes (porosité, manque de fusion, etc.) sont les sources principales provoquant des défaillances dans les pièces métalliques fabriquées par *L-PBF (Laser Powder Bed Fusion)*. Surtout si elles sont sujettes à des sollicitations mécaniques répétées. La résistance à la fatigue de ces composants peut être grandement améliorée en utilisant des traitements thermiques appropriés (*HIP-High Isostatic Pressure*, p. ex.) et des parachèvements surfaciques adaptés (électropolissage, p. ex.). Cette étude s'est focalisée sur le comportement de pièces industrielles en attachant autant d'importance à la microstructure, la porosité et à l'état de surface.

## Erhöhte Lebensdauer von Titanteilen durch additive Fertigung

Das Vorhandensein von Oberflächen-defekten (Rauheit und Risse) oder internen Defekten (Porosität, mangelnde Verschmelzung usw.) sind die Hauptursachen für das Versagen von Metallteilen, die mit *L-PBF (Laser Powder Bed Fusion)* hergestellt werden. Insbesondere, wenn sie wiederholter mechanischer Belastung ausgesetzt sind. Durch geeignete Wärmebehandlungen (z. B. *HIP-High Isostatic Pressure*) und Oberflächenveredelungen (z. B. Elektropolieren) kann die Ermüdungsbeständigkeit dieser Bauteile deutlich verbessert werden. Unsere Studie konzentrierte sich auf das Verhalten von Industrieteilen und legte dabei großen Wert auf die Mikrostruktur, Porosität und den Oberflächenzustand.

Le comportement en fatigue de pièces en alliage de titane Ti-6Al-4V produites par fabrication additive, notamment par la méthode *L-PBF*, a été étudié. L'étude s'est focalisée sur deux produits industriels, une vis médicale et une pièce nautique (figure 1), de façon à tenir compte des effets de la géométrie, de la taille, de la charge appliquée et de la fonction à garantir.

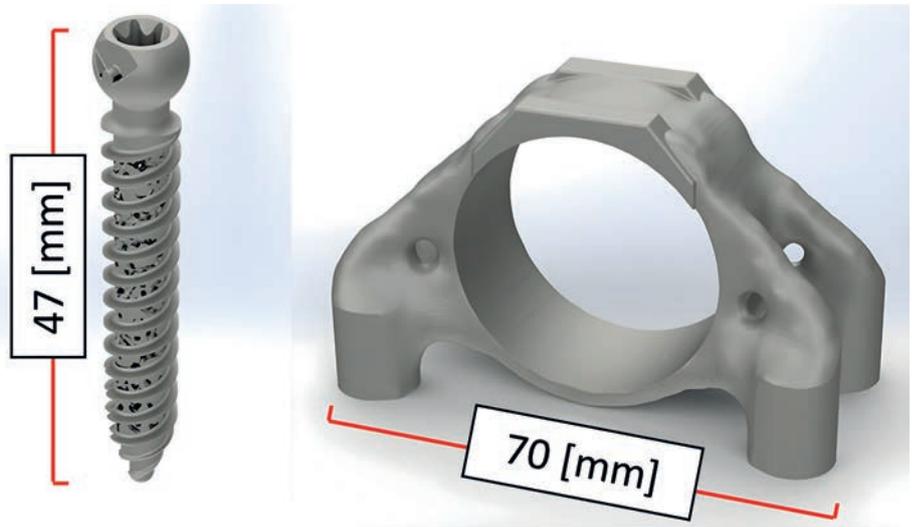
Une importance particulière a été apportée à l'amélioration de la microstructure, à la porosité et à l'état de surface des pièces, afin d'optimiser leur performance en fatigue, ce qui se traduit par une meilleure durabilité.

Le défi scientifique consistait à rendre ces composants plus performants et plus durables grâce à une amélioration des procédés de post-traitement.

La HEIG-VD était responsable de la fabrication et de la caractérisation volumique des pièces, tandis que la HE-Arc Ingénierie effectuait le post-traitement par électropolissage et la caractérisation surfacique.

### Fabrication additive des pièces en titane

Les différentes pièces ont été produites selon le procédé *L-PBF* dans le centre de technologies additives AddiPole situé à Sainte-Croix. L'orientation de construction, les épaisseurs de couche et les paramètres laser ont été varié afin d'optimiser le processus d'impression. Après optimisation des paramètres d'impression des

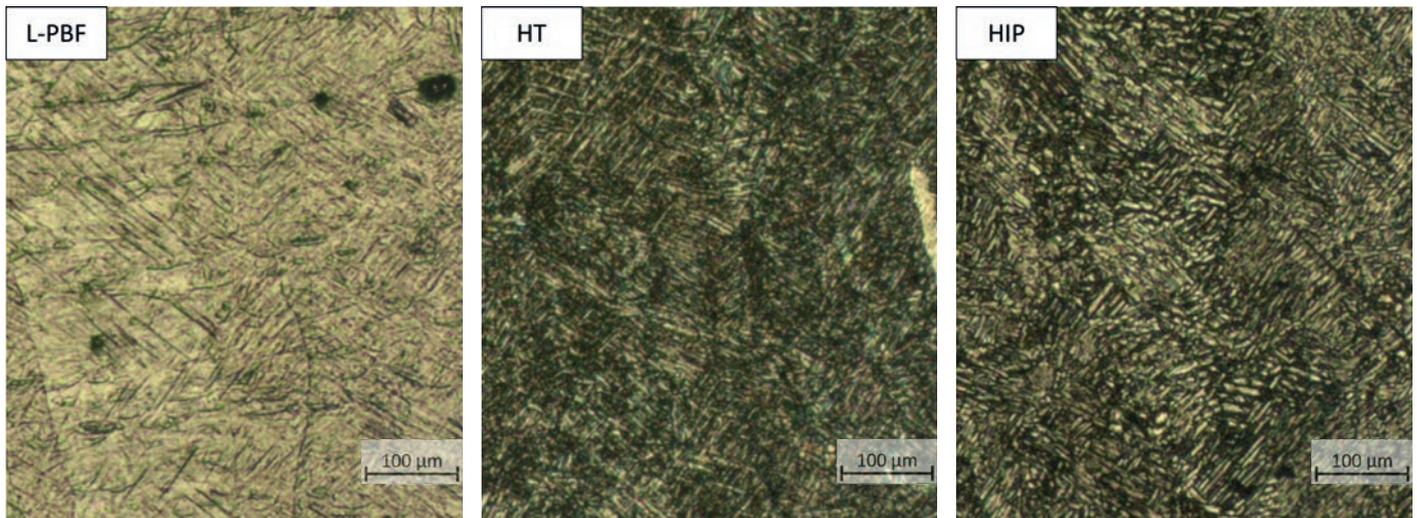


■ Fig. 1: Deux exemples de pièces *L-PBF* fabriquées par AddiPole.

composants, les paramètres du procédé ont été conservés tout au long du projet, afin de garantir une reproductibilité dans les mesures comparatives.

La poudre en alliage Ti-6Al-4V utilisée était d'origine commerciale et standard. Le rapport entre la quantité de poudre neuve et celle recyclée par lot de production était défini. Généralement, une poudre neuve a été utilisée pour l'application médicale (vis) et une poudre recyclée pour l'application nautique (palier de safran).

L'utilisation de logiciels de simulation et de conception adaptés a fortement réduit le nombre d'essais de fabrication. Des modélisations par éléments finis ont aidé à déterminer les parties des pièces les plus exposées aux sollicitations mécaniques, ainsi que celles présentant les plus grandes contraintes. L'emploi d'un tomographe pour la détection de défauts internes a permis de contrôler la qualité des pièces de manière non destructive.



■ Fig. 2: Différentes microstructures obtenues en fonction des traitements appliqués.

### Post-traitements volumiques

Les pièces en Ti-6Al-4V issues de L-PBF sont dures et fragiles à l'état brut. Des traitements thermomécaniques ont été réalisés avant le parachèvement de surface pour modifier la microstructure et obtenir les meilleures propriétés possibles en fatigue. Deux traitements ont été comparés : la compression isostatique à chaud (HIP) et le traitement thermique sous vide (HT). Le traitement HIP a été réalisé dans les mêmes conditions de température et de durée que le traitement HT.

Une analyse de la géométrie et des dimensions des pièces a été menée avant et après traitement. Des mesures de la densité, de la rugosité et de la dureté avant et après le traitement ont été effectuées.

Les microstructures des pièces avant et après les traitements volumiques ont été analysées (figure 2). Le lien entre ces microstructures et les conditions de post-traitement HIP ou HT ont montré que les traitements HT et HIP changent la microstructure d'aiguilles  $\alpha'$  en un mélange de  $\alpha + \beta$ . La microstructure HT semble plus fine que la microstructure HIP. Par ailleurs, la porosité interne a diminué lors du traitement HIP. Le résultat est visible aussi bien en visualisant la microstructure (figure 2), qu'en effectuant des mesures par pesée d'Archimède.

### Post-traitements surfaciques

Les essais d'électropolissage (EP) ont montré que l'utilisation d'une solution exempte d'acides et de sels toxiques peut donner d'excellents résultats malgré un état de surface de base relativement rugueux (figure 3).

Plusieurs essais ont été réalisés afin de déterminer les meilleurs paramètres. Les

critères étant de diminuer grandement la rugosité, tout en enlevant peu de matière. Les différents traitements surfaciques ont ensuite été choisis en fonction des résultats obtenus lors des essais de fatigue mécanique.

La rugosité a été mesurée tout au long de l'étude, afin d'avoir les meilleurs paramètres possibles pour la diminuer. La raison en est que la rugosité est un facteur important, car les aspérités de surface sont des sites d'amorce de fissures. Les mesures par microscopie électronique à balayage ont permis de vérifier que le but de l'électropolissage était atteint et que les résultats sont reproductibles (figure 3).

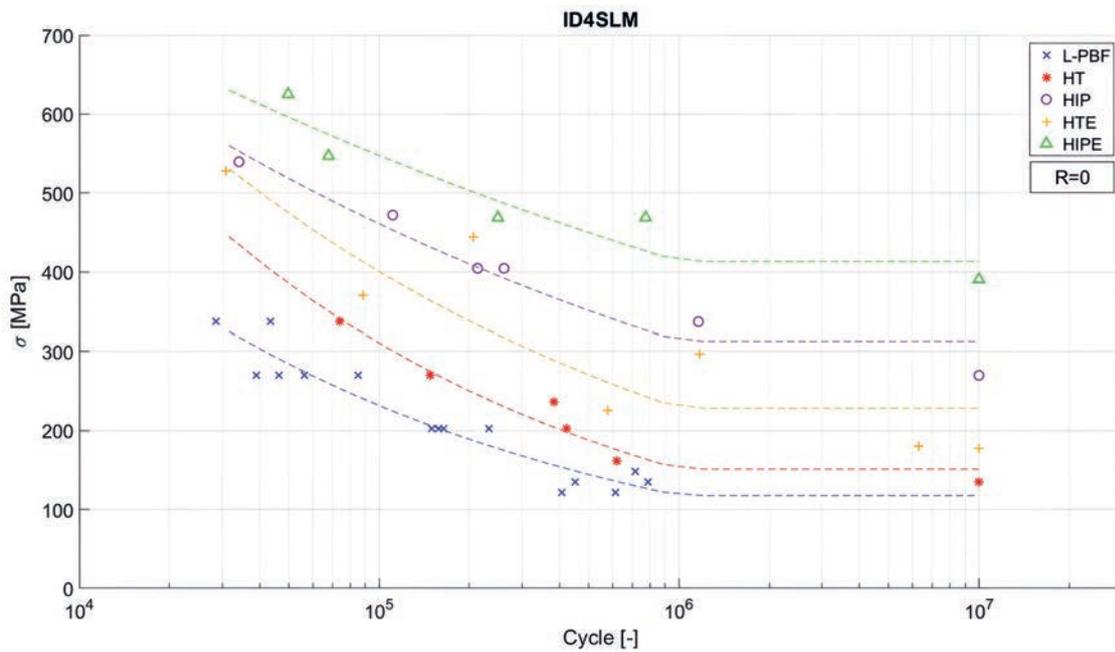
### Essais de fatigue

Le cœur du projet a été la mise en place de nombreux essais d'endommagement par sollicitations répétées (essais de fatigue) pour déterminer les courbes de Wöhler des pièces en fonction des paramètres de post-traitements thermiques et surfaciques (figure 4).

Une charge unidirectionnelle avec  $R = 0$ , ( $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ) a été appliquée pour les essais. La machine a été pilotée en contrôle de force avec une fréquence de sollicitation fixe et constante. Un minimum de cinq échantillons a été pris en compte pour chaque état des pièces avant essai.



■ Fig. 3: Effet du polissage électrochimique sur l'état de surface.



■ Fig. 4: Courbes de Wöhler obtenues pour différents traitements de parachèvement.

Le but ultime consistait à apporter à l'industrie des réponses concrètes et fiables sur la fabrication idéale et sur le parachèvement optimal des composants produits par L-PBF en fonction des besoins spécifiques. Les conclusions générales sont les suivantes :

1. La microstructure L-PBF brute de fabrication n'est clairement pas recommandée pour des performances en fatigue élevées.
2. Le traitement HIP est le post-procédé volumique optimal pour améliorer la résistance à la fatigue, mais n'est pas toujours évident à inclure dans une gamme de fabrication.
3. L'électropolissage améliore le comportement en fatigue des pièces de manière significative, mais peut entraîner des modifications négatives de la géométrie s'il est mal maîtrisé. ■

### À propos de la HEIG-VD

L'Institut COMATEC de la HEIG-VD offre une vaste palette de compétences, allant de la méthodologie de conception intégrée et structurée à la conception mécanique et microtechnique, en passant par la modélisation et l'analyse numérique, le choix et la caractérisation des matériaux, les techniques d'assemblage, les essais destructifs et non destructifs de matériaux, l'analyse de structures mécaniques, ainsi que tout ce qui a trait à l'emballage et au conditionnement.

### Contact

■ Randoald Müller  
HEIG-VD, Institut COMATEC  
CH-1401 Yverdon-les-Bains  
Tél. +41 24 557 75 79  
[www.heig-vd.ch/rad/instituts/comatec](http://www.heig-vd.ch/rad/instituts/comatec)



■ Oksana Banakh  
Haute Ecole Arc Ingénierie  
CH-2300 La Chaux-de-Fonds  
Tél. +41 32 930 25 20  
[www.he-arc.ch/domaine/ingenierie](http://www.he-arc.ch/domaine/ingenierie)



**WALTHER  
TROWAL!**

**BEWÄHRT IN  
DER KÖNIGSKLASSE.**

Starten Sie mit unserer Gleitschleiftechnik  
von der Pole-Position.

[walther-trowal.com](http://walther-trowal.com)

WE IMPROVE SURFACES!