

Optimisation du traitement thermique de pièces en alliage Ti-6Al-4V produites par fusion laser sur lit de poudre

Thèse réalisée par **Quentin Gaillard** au sein du LGF (Mines Saint-Étienne) et de MATEIS (INSA Lyon) sous la direction de :

- **Christophe Desrayaud**, Professeur, LGF, Mines Saint-Étienne (directeur de thèse)
- **Xavier Boulnat**, Maître de conférences, MATEIS, INSA Lyon (co-encadrant)
- **Sophie Cazottes**, Maître de conférences HDR, MATEIS, INSA Lyon (co-encadrante)
- **Sylvain Dancette**, Maître de conférences HDR, MATEIS, INSA Lyon (co-encadrant)

Mots-clés : Fabrication additive, Fusion laser sur lit de poudre, Ti-6Al-4V, Traitements thermiques, Caractérisation microstructurale, Propriétés mécaniques, Alpha-case, Anisotropie

Résumé :

Le Ti-6Al-4V (TA6V) est un alliage répandu dans le secteur aéronautique grâce à son excellente résistance spécifique et sa bonne tenue à la corrosion. Parmi les procédés de fabrication additive, la fusion laser sur lit de poudre (L-PBF) permet l'élaboration de pièces en TA6V de géométrie complexe intégrant une optimisation topologique et une réduction des assemblages en comparaison aux pièces fabriquées traditionnellement à partir de composants obtenus par usinage.

Cependant, du fait des importants gradients thermiques et vitesses de refroidissement mis en jeu, la métallurgie et les propriétés du TA6V post L-PBF sont très différentes de celles obtenues par procédés conventionnels. Ainsi, la pièce n'est ni terminée ni prête à l'emploi et des opérations de post-traitements sont nécessaires. En particulier, l'élimination des contraintes résiduelles et l'évolution de la microstructure brute de fabrication font partie des pistes à explorer pour définir des post-traitements thermiques à même d'obtenir les propriétés d'emploi visées.

L'objectif fixé dans cette thèse est de proposer une gamme de TT industrielle « optimisée », permettant à la fois une relaxation des contraintes résiduelles et une augmentation de l'allongement à rupture tout en conservant une limite d'élasticité et une résistance mécanique élevées.

Tout d'abord, une caractérisation fine de l'état brut de fabrication est réalisée. La microstructure issue du procédé est anisotrope et multi-échelle : le bain liquide se solidifie sous la forme de grains β colonnaires dans la direction de fabrication qui se transforment au refroidissement en martensite α' dure et fragile. Les températures de transformation (décomposition martensitique et de transus) sont déterminées afin de proposer des plages de température pertinentes pour le TT post-fabrication.

Les travaux portent ensuite principalement sur l'étude de l'effet des paramètres du TT (température et temps de maintien, atmosphère de travail, conditions de refroidissement) sur l'évolution des relations microstructure / propriétés de l'alliage. Il est montré que les TT réalisés dans le domaine biphasé proche de la température de transus entraînent un retour vers une microstructure d'équilibre $\alpha + \beta$ permettant un gain significatif en ductilité et en résilience. Par ailleurs, les alliages de titane sont soumis à haute température à la diffusion d'oxygène en surface (alpha-case) en présence de molécules oxydantes. L'impact de l'alpha-case sur les propriétés mécaniques statiques est étudié en détail et un compromis entre évolution bénéfique des microstructures et formation néfaste d'alpha-case est proposé. Enfin, l'anisotropie microstructurale issue du procédé entraîne une fragilisation post striction qui se traduit par une perte d'allongement à rupture pour des sollicitations orthogonales à la direction de fabrication. Les gammes de TT optimisées permettent de réduire cette anisotropie mécanique.

Keywords: Additive Manufacturing, Laser Powder Bed Fusion, Ti64, Heat Treatments, Microstructural Characterization, Mechanical Properties, Alpha-case, Anisotropy

Abstract:

Ti-6Al-4V (TA6V) is a widely used alloy in the aerospace sector due to its excellent specific strength and good corrosion resistance. Among additive manufacturing processes, laser powder bed fusion (L-PBF) enables the production of complex geometry TA6V parts with topological optimization and reduced assembly compared to traditionally manufactured components obtained through machining.

However, due to the significant thermal gradients and cooling rates involved, the metallurgy and properties of post-L-PBF TA6V are very different from those obtained by conventional processes. As a result, the part is neither finished nor ready for use, and post-processing operations are required. In particular, the elimination of residual stresses and the evolution of the as-built microstructure are areas to explore in order to define heat treatment processes that achieve the desired properties.

The objective of this thesis is to propose an "optimized" industrial heat treatment range that allows for relaxation of residual stresses and an increase in elongation at fracture while maintaining high yield strength and mechanical resistance.

Firstly, a detailed characterization of the as-built state is performed. The microstructure resulting from the process is anisotropic and multi-scale: the liquid pool solidifies into columnar β grains in the build direction, which transform into hard and brittle α' martensite upon cooling. The transformation temperatures (martensitic decomposition and transus) are determined to propose relevant temperature ranges for post-processing heat treatments.

The work primarily focuses on studying the effect of heat treatment parameters (temperature and holding time, working atmosphere, cooling conditions) on the evolution of microstructure-property relationships in the alloy. It is shown that heat treatments carried out in the biphasic region near the transus temperature lead to a return to an equilibrium $\alpha+\beta$ microstructure, resulting in significant gains in ductility and resilience. Additionally, titanium alloys are subject to oxygen diffusion on the surface at high temperatures (alpha-case) in the presence of oxidizing molecules. The impact of alpha-case on static mechanical properties is studied in detail, and a compromise between beneficial microstructure evolution and detrimental alpha-case formation is proposed. Finally, the microstructural anisotropy resulting from the process leads to post-necking embrittlement, resulting in a loss of elongation at fracture for loads orthogonal to the build direction. The optimized heat treatment ranges help reduce this mechanical anisotropy.