Doctorant : Théo Dusautoira,b

Directeur de thèse : Siegfried Fouvryb, Directeur de recherche CNRS

Co-encadrant de thèse : Bruno Berthelb, Maitre de conférences

Encadrants entreprise : Paul Matzenb et Klaus-Dieter Meckb

aUniv Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, ENTPE, LTDS, UMR5513, 69130 Ecully, France

bJohn Crane, 31 Nash Road, Trafford Park, Manchester M17 1SS, United Kingdom

Titre : Etude expérimentale et modélisation de l’endurance en fatigue sous gradients de contraintes de composants Ti-6Al-4V élaborés par fabrication additive : application aux systèmes d’accouplement de transmission de puissance.

Mots clés : Fabrication additive, fatigue, défauts, Ti-6Al-4V, gradient de contrainte

Cette thèse vise à élaborer un modèle de prédiction de rupture en fatigue pour les pièces en alliage Ti-6Al-4V fabriquées par fusion laser sur lit de poudre. L'objectif de John Crane est d'optimiser les accouplements mécaniques permettant la transmission de couple entre machines rotatives tout en compensant les désalignements. Ces désalignements, couplés à un couple constant, entraînent une sollicitation cyclique et donc un phénomène de fatigue. Ces derniers sont dimensionnés pour atteindre des durées de vie presque infinies. Actuellement, ces accouplements sont composés de nombreuses pièces et leur assemblage requiert plusieurs étapes. De plus, ils sont souvent volumineux, lourds et leur défaillance peut entraîner des dommages matériels et physiques considérables. Ainsi, en utilisant des logiciels d'éléments finis, de nouveaux designs aux formes complexes ont été développés pour remplacer plusieurs pièces par une seule pièce flexible. Leur fabrication étant impossible par des méthodes conventionnelles, un procédé de fabrication additive a été utilisé et il s’agit de la fusion sur lit de poudre.

L’état de contrainte subi par les accouplements flexibles est de nature multiaxiale, et leur forme complexe entraîne des gradients de contraintes. Par conséquent, le modèle de prédiction de rupture en fatigue a été élaboré à partir d'essais expérimentaux réalisés sur des éprouvettes reproduisant un niveau de gradient de contrainte similaire à celui des composants industriels. Les résultats des essais montrent des différences significatives de résistance en fatigue en présence et en l'absence de gradient de contrainte. Ceci s'explique par l'effet notable du volume résultant des porosités internes, un défaut inhérent au processus de fabrication additive. Ces défauts, combinés à une rugosité de surface élevée et des microstructures particulières, conduisent généralement à une résistance en fatigue inférieure par rapport aux matériaux fabriqués par des méthodes conventionnelles. Ainsi, des traitements de surface et des traitements thermiques ont été sélectionnés pour évaluer leur impact sur la résistance en fatigue du Ti-6Al-4V imprimé en 3D. Une méthode basée sur des essais d'auto-échauffement avec mesure thermique par caméra infrarouge a été utilisée pour estimer rapidement les limites de fatigue du matériau en fonction du procédé de finition et de la géométrie de l'éprouvette.

L'analyse des résultats et des défauts responsables de la rupture, en utilisant le diagramme de Kitagawa-Takahashi reliant contrainte et taille de défaut, ont permis de développer un modèle de prédiction de résistance en fatigue. Ce modèle s'avère efficace pour prédire la résistance en fatigue à partir de mesures de rugosité simples ou d’études statistiques sur les défauts.

En conclusion, un modèle multiaxial de prédiction de rupture en fatigue basé sur les propriétés obtenues à partir d'éprouvettes reproduisant un gradient similaire à celui des accouplements, confronté à des essais de fatigue réalisés en conditions industrielles, s'avère pertinent et permet de prédire la rupture en fatigue en fonction du processus de finition utilisé

Keywords: Additive manufacturing, fatigue, defects, Ti-6Al-4V, stress gradient

Title: Multiaxial fatigue characterization of titanium parts produced by additive manufacturing: application to 3D printed flexible couplings.

The objective of this thesis is to develop a fatigue failure prediction model for Ti-6Al-4V alloy parts produced by laser fusion on a powder bed. John Crane's goal is to optimize mechanical couplings for transmitting torque between rotating machines while accommodating misalignments. These misalignments, combined with a constant torque, result in cyclic loading and thus a fatigue phenomenon. These couplings are designed to achieve nearly infinite lifespans. Currently, these couplings consist of many parts, and their assembly requires multiple steps. Moreover, they are often heavy, and their failure can lead to significant material and physical damage. Therefore, using finite element software, new complex designs have been developed to replace multiple parts with a single flexible piece. As their manufacture is impossible using conventional methods, an additive manufacturing process, specifically powder bed fusion, was used.

The stress state experienced by flexible couplings is of a multiaxial nature, and their complex shape leads to stress gradients. Consequently, the fatigue failure prediction model was developed based on experimental tests conducted on specimens replicating a stress gradient level similar to that of industrial components. The tests results show significant differences in fatigue strength in the presence and absence of stress gradient. This can be explained by the significant volume effect resulting from internal porosities, an inherent defect of additively manufactured materials. These defects, combined with high surface roughness and unique microstructures, generally lead to lower fatigue strength compared to materials produced by conventional methods. Thus, post-processing treatments such as surface and heat treatments were selected to assess their impact on the fatigue strength of 3D printed Ti-6Al-4V. A method based on self-heating tests with thermal measurement using an infrared camera was used to quickly estimate the fatigue limits of the material based on the post-processing treatment and specimen geometry.

The analysis of results and defects responsible for failure, using the Kitagawa-Takahashi diagram relating stress and defect size, allowed the development of a fatigue strength prediction model. This model proves effective in predicting fatigue strength from simple roughness measurements or statistical studies on defects.

In conclusion, a multiaxial fatigue failure prediction model based on properties obtained from specimens replicating a gradient similar to that of couplings, when confronted with fatigue tests conducted in industrial conditions, proves relevant and enables the prediction of fatigue failure based on the used post-processing treatment.