

Analyse microstructurale et mécanique de l'effet « dwell » dans le Ti-6Al-4V

Lucas Prince

Résumé : Des ruptures prématurées en service de pièces de moteur d'avion en alliage de titane ont été constatées ces dernières années. Au-delà du caractère cyclique du chargement mécanique associé au vol, le maintien à une contrainte élevée contribuerait à l'origine de ce phénomène. L'abatement de la durée de vie par rapport à de la fatigue pure qui en résulte est appelé effet « dwell ». Depuis 50 ans, un certain nombre d'études ont été menées ; elles se sont intéressées à différents alliages de titane et, plus récemment, au Ti-6Al-4V, en se focalisant sur le rôle de la microstructure sur les mécanismes d'amorçage et de propagation des fissures. Une rupture liée à l'effet « dwell » se distingue de la fatigue conventionnelle par l'amorçage interne de fissures, accompagné d'un ensemble de facettes dites de quasi-clivage. Ces zones facettées sont associées à la présence de macrozones où les constituants métallurgiques présentent une orientation cristallographique spécifique. Celles-ci peuvent être de dimension millimétrique. Les travaux de la thèse ont permis de caractériser les différents modes d'endommagement opérant lorsqu'un maintien en contrainte est appliqué au cours du chargement cyclique. Pour cela, des essais de fatigue et de fatigue-dwell ont été effectués sur un alliage Ti-6Al-4V à microstructure bimodale. Différents modes d'endommagement ont pu être identifiés en fonction des paramètres mécaniques, de microstructure et de texture. L'étude des mécanismes d'amorçage et de propagation des fissures via l'analyse quantitative des faciès de rupture, en complément d'une caractérisation de la cinétique d'amorçage des fissures, a permis de clarifier la compétition entre ces différents modes d'endommagement. A partir de l'analyse statistique de l'ensemble des données collectées, un outil de prédictions des durées de vie a également été proposé. Enfin, de manière à guider les pratiques de dimensionnement des pièces industrielles, les contributions des différents stades de fatigue ont été évaluées par différentes approches expérimentales. Cela a permis, d'une part, de mieux comprendre la compétition entre l'amorçage de fissures internes conduisant à une rupture liée à l'effet « dwell » et celles de surface conduisant à une rupture de fatigue conventionnelle et, d'autre part, de mieux cerner les conditions mécaniques et microstructurales les plus défavorables, mettant en lumière le caractère critique de la présence et des dimensions des macrozones. Ces résultats ont finalement abouti à la définition de lois spécifiques de propagation des fissures à travers et en dehors de ces macrozones.

Mots clés : Fatigue-dwell, Ti-6Al-4V, Mécanisme d'endommagement, Faciès de rupture, Comportement mécanique, Macrozone, Microstructure

Microstructural and mechanical analysis of the "dwell" effect in Ti-6Al-4V

Lucas Prince

Abstract: Premature in-service failures of titanium alloy aircraft engine components have been observed recently. Beyond the cyclic mechanical loading associated with flight, sustained high-stress loading is believed to contribute to these events. The lifetime debit induced by load holds is generally referred to as “dwell” effect. Over the past 50 years, a number of studies have emerged, focusing on different titanium alloys and, more recently, on the Ti-6Al-4V alloy in particular, through the investigation of crack initiation and growth mechanisms in relation with microstructure. Dwell-fatigue failures can be distinguished from conventional fatigue failures by the internal character of crack initiation, which is accompanied by an extended area covered by so-called quasi-cleavage facets. These faceted regions are associated to macrozones gathering metallographic constituents with specific crystallographic orientations. In this study, the different failure modes operating when a load hold is introduced in the loading waveform were characterized. To this end, fatigue and dwell-fatigue tests were performed on a Ti-6Al-4V alloy with a bimodal microstructure. Failure mode classification allowed to identify most influential mechanical, microstructure, and texture parameters. The study of crack initiation and propagation mechanisms through quantitative characterizations of fracture surfaces, in addition to the analysis of crack nucleation kinetics, enabled an improved understanding of the competition between the different failure modes. Based on a statistical analysis of collected data, a lifetime prediction tool was also proposed. Finally, in order to provide guidance regarding the design of industrial components, the contributions of the different fatigue stages to the overall dwell-fatigue lifetime were assessed using various experimental approaches. This information allowed an improved understanding of the competition between internal crack initiation events leading to dwell-fatigue failures, and surface cracks leading to conventional fatigue failures. In addition, this new understanding enabled the identification of worst-case scenarios in a dwell-fatigue framework, with the presence and dimensions of macrozones as critical features. These findings led to the definition of specific crack propagation laws both through and outside of these macrozones.

Keywords: Dwell-fatigue, Ti-6Al-4V, Crack propagation, Fractography Mechanical behaviour, Macrozone, Microstructure