Caractérisation de la sensibilité à la fatigue fluage de l'alliage de titane TA6V en présence d'un concentrateur de contrainte : effet sur l'amorçage et la propagation de fissures.

Julie BOUILLON [1], Benjamin Dod [2] , Patrick Villechaise[3] et Samuel Hémery [4]

[1] Institut PPRIME, Université de Poitiers, CNRS, ENSMA, UPR 3346, Futuroscope-Chasseneuil, 86961, France

[2] AIRBUS, 1ACMU2, 31300, Toulouse, France

Points d'intérêt

- Atténuation de l'effet « dwell » en présence de concentrateurs de contrainte.
- Relations entre les champs de déformation et l'abattement de la durée de vie en fatigue fluage.
- Comparaison des caractéristiques fractographiques liées à une rupture de fatigue et de fatigue fluage en présence de concentrateurs de contrainte.

1 Introduction

Le titane et ses alliages sont utilisés dans les pièces de structure de l'avion et dans certaines pièces de moteur. Ils sont préférés à d'autres matériaux pour leurs propriétés, telles qu'une résistance spécifique élevée, ou une excellente résistance à la corrosion [1]. Leurs désavantages résident dans leur coût élevé, notamment en raison de leur réactivité avec l'oxygène, ou leur susceptibilité au fluage à des températures inférieures à 15% de T_{fusion} [2].

Ainsi, les chargements mécaniques de fatigue fluage que subissent certains composants aéronautiques peuvent mener à des ruptures prématurées. Ce phénomène, appelé effet « dwell », s'exprime par un abattement de la durée de vie en nombre de cycles lorsque le matériau est soumis à une sollicitation de fatigue fluage par rapport à une sollicitation de fatigue conventionnelle. Cet abattement est notamment quantifié par le DFD (Dwell Fatigue Debit). Il peut atteindre plusieurs ordres de grandeur, et s'accompagne d'une transition des sites d'amorçage depuis la surface libre en fatigue conventionnelle vers la sous-surface en fatigue fluage [3-5].

L'alliage TA6V est utilisé comme matériau de structure de la cellule globale des avions, et la géométrie complexe des composants associés induit des concentrateurs de contrainte. En fatigue conventionnelle, il a été vu que la présence de concentrateurs de contrainte induit une réduction de la durée de vie en comparaison d'éprouvettes non entaillées [6,7]. Cependant, peu d'études lient le comportement de composants avec concentrateurs de contrainte à la sensibilité de cet alliage à l'effet « dwell » en cas de sollicitations de fatigue fluage, motivant ainsi l'existence de ces travaux.

2 Matériaux et méthodes

Le matériau utilisé dans cette étude est l'alliage de titane TA6V. Il est issu d'une plaque d'épaisseur $e = 80\ mm$ laminée selon 2 directions. Sa microstructure est nodulaire avec un diamètre moyen des nodules de $5{,}2\ \mu m$.

Des éprouvettes, de géométrie dite « KBR » ont été utilisées pour considérer un large panel de géométries d'entailles, permettant d'obtenir différents facteurs de concentrations de contraintes. Ils seront évalués en utilisant le facteur K_t. Il correspond au rapport entre la contrainte locale maximale, en fond d'entaille, et la contrainte moyenne s'appliquant sur la section minimale, qui sont estimées en considérant un comportement élastique du matériau.

L'ensemble des faces et des entailles sont polies jusqu'à l'application d'une solution colloïdale de particules de silice. Sur des éprouvettes KBR « lisses » (éprouvettes non entaillées : $K_t = 1$), des essais de traction à une vitesse de déformation $\dot{\varepsilon} = 1.10^{-4}\ s^{-1}$ ont d'abord permis d'obtenir les propriétés mécaniques du matériau en traction, afin de définir les niveaux de contrainte utilisés tout au long de l'étude. Par la suite, des essais de fatigue conventionnelle (signal triangulaire, contrôle de charge, f = 0,5 Hz) et de fatigue fluage (avec l'ajout d'un maintien à charge maximale de 120 s et à charge minimale de 1 s) ont été réalisés sur éprouvettes lisses et sur éprouvettes entaillées. Pour ces essais, le rapport de charge est de 0,1 et 3 niveaux de contrainte moyenne calculée sur la section minimale ($\sigma_{net}^{max} = (85 - 90 - 95)\%\ Rp^{0.2\%}$) ont été appliqués.

Les champs de déformation en surface sont mesurées expérimentalement par corrélation d'images numériques. L'analyse est faite via le programme « Ncorr » pour Matlab [8]. En complément, le comportement mécanique est modélisé par la méthode des éléments finis. Ce dernier s'appuie sur un modèle proposé par J.L. Chaboche pour les matériaux ayant un comportement élasto-viscoplastique, prenant ainsi en compte l'écrouissage isotrope et cinématique non linéaire, mais aussi le potentiel viscoplastique du matériau [9]. Après rupture, les faciès de rupture sont examinés et des analyses microstructurales sont réalisées à l'aide d'un MEB-FEG muni d'un détecteur EBSD.

3 Résultats et discussions

Essais sur éprouvettes lisses

Avant d'étudier l'impact des concentrateurs de contraintes sous sollicitations fatigue fluage, il est important d'évaluer la sensibilité intrinsèque du matériau à l'effet « dwell ». Ainsi, des éprouvettes non-entaillées ont été soumises à des chargements de fatigue conventionnelle et de fatigue fluage, à 3 niveaux de contrainte maximale distincts ($\sigma^{max} = (85 - 90 - 95)\%\ Rp^{0.2\%}$) .

Ces résultats montrent une sensibilité de l'alliage au cœur de cette étude à l'effet « dwell ». Il subit un abattement évident de sa durée de vie avec l'introduction d'un maintien à contrainte maximale. Celui-ci est d'autant plus important que le niveau de contrainte appliqué est élevé. En effet, il a respectivement été obtenu pour les essais à $\sigma^{max} = 95\%\ Rp^{0.2\%}$ et à $\sigma^{max} = 90\%\ Rp^{0.2\%}$, un $DFD_{\sigma^{max}=95\%\ Rp^{0.2\%}}$ équivalent à 24,1 et un $DFD_{\sigma^{max}=90\%\ Rp^{0.2\%}}$ égal à 7,7. L'essai en fatigue fluage à $\sigma^{max} = 85\%\ Rp^{0.2\%}$, arrêté avant rupture après plus de 46 000 cycles, confirme la disparition de l'effet « dwell » avec la diminution du niveau de contrainte, avec un $DFD_{\sigma^{max}=85\%\ Rp^{0.2\%}}$ inférieur à 3,1. Tel que largement démontré au cours des différentes études de l'influence d'un temps de maintien dans les cycles de chargement, les faciès de rupture des éprouvettes soumises à ce type de sollicitations présentent plusieurs éléments caractéristiques [3-5]. De nombreuses zones facettées, non connectées à la surface libre de l'éprouvette, présentent chacune une facette lisse semblant être le site d'amorçage de la fissure. Ainsi, il est difficile de définir une fissure principale, contrairement à ce qui est majoritairement observé en fatigue conventionnelle.

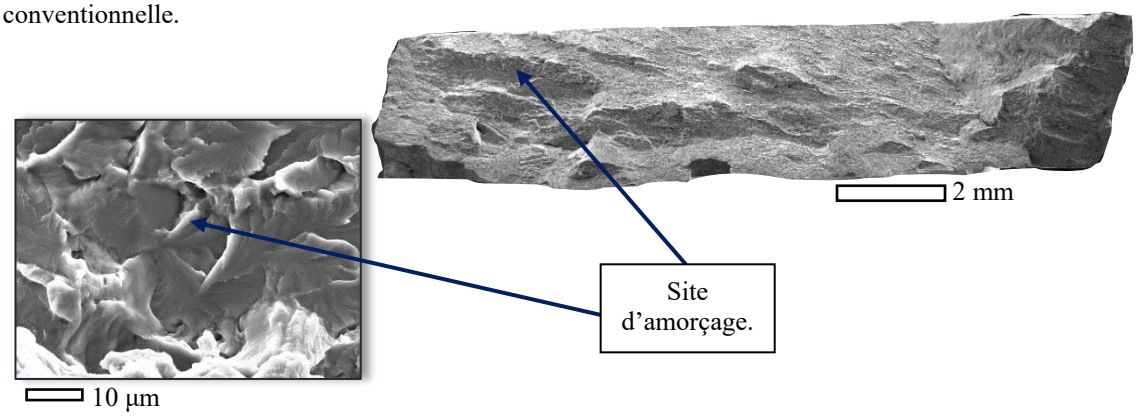


Figure 1. Micrographies MEB d'un faciès de rupture d'une éprouvette KBR lisse soumise à un chargement de fatigue fluage ($\sigma_{net}^{max} = 90\%\ Rp^{0.2\%}$) .

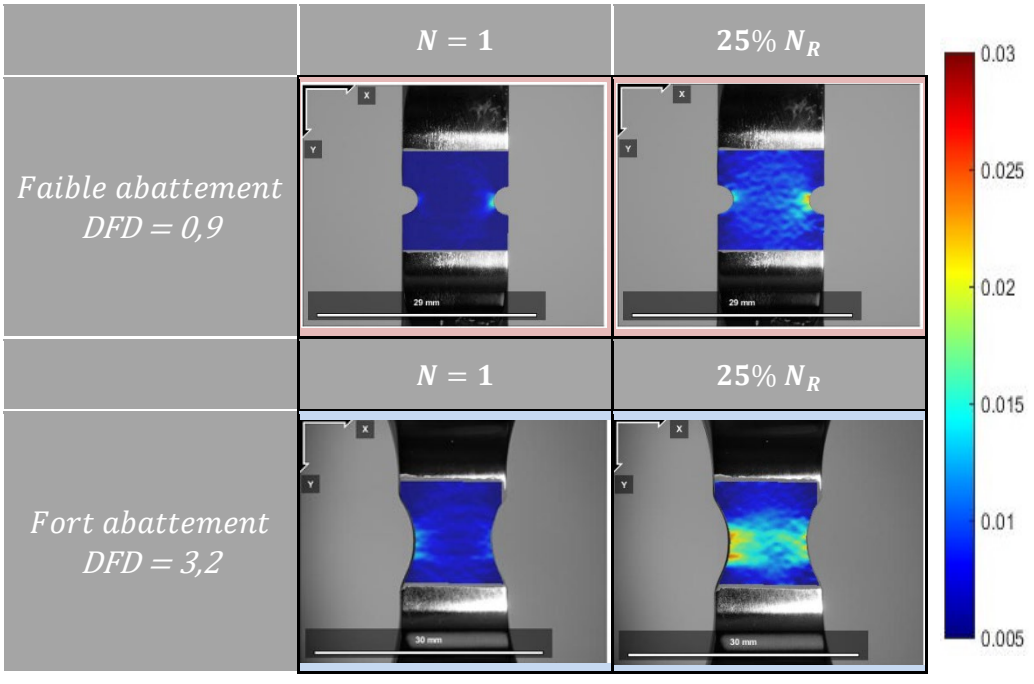
Essais sur éprouvettes entaillées

En fatigue conventielle, une réduction de la durée de vie est obtervée pour les éprouvettes entaillées en comparaison des éprouvettes lisses pour un même niveau de contrainte moyenne. Par exemple, les durées de vie en fatigue conventionnelle pour des éprouvettes lisses soumises à des chargements avec σ^{max} = [85-95]% $Rp^{0.2\%}$ s'étendent sur l'intervalle N_R = [36 579 – 143 096] cycles. Pour les éprouvettes avec K_t = 1,38, soit le K_t le plus faible considéré dans notre étude, pour ces mêmes niveaux de contrainte moyenne sur la section minimale (σ_{net}^{max}), des durées de vie N_R = [16 500 – 22 500] cycles sont obtenues. De plus, plus le facteur K_t est élevé, plus les durées de vie sont faibles et moins elles sont sensibles au niveau de contrainte moyenne σ_{net}^{max}. En effet, pour $K_t = 2{,}26$, soit le K_t le plus élevé considéré dans cette étude, les durées de vie, en fatigue conventionnelles, sont incluses dans la plage $N_R = [4587 - 5595]$ cycles.

Par ailleurs, les faciès de rupture issus de sollicitations en fatigue conventionnelles appliquées sur des éprouvettes entaillées présentent un amorçage des fissures en surface et localisé en fond d'entaille. Le caractère surfacique est similaire à ce qui est observé sur les éprouvettes lisses. Le nombre de sites d'amorçage croît avec K_t et avec σ^{max}. Ainsi, pour les conditions les moins sévères, à savoir $K_t = 1{,}38$ et $\sigma^{max} = 85\%\ Rp^{0.2\%}$, le faciès de rupture présente un unique site d'amorçage surfacique. Pour les conditions les plus sévères, soit $K_t = 2{,}26$ et $\sigma^{max} = 95\%\ Rp^{0.2\%}$, 8 sites d'amorçage surfaciques sont comptabilisés. Cela est en accord avec le niveau de déformation localisé en fond d'entaille augmentant avec K_t et avec le niveau de contrainte moyenne appliqué.

L'ajout d'un temps de maintien à contrainte maximale lors de sollicitations cycliques sur l'ensemble des éprouvettes entaillées n'entraîne pas, quelques que soient les conditions expérimentales, d'abattement significatif de la durée de vie. Cette conclusion indique une réduction de l'intensité de l'effet « dwell ». Ainsi, dans les cas où l'effet « dwell » reste le plus fort, les résultats mettent en avant un DFD = 3,2, ce dernier étant lié à K_t=1,38 et $\sigma_{net}^{max} = 95\%\ Rp^{0.2\%}$. Le DFD le plus faible, inférieur à 1, est obtenu pour les conditions suivantes : K_t=2,26 et $\sigma_{net}^{max} = 85\%\ Rp^{0.2\%}$. Cette tendance peut, d'une part, s'expliquer par les niveaux de déformations subis par les éprouvettes en fond d'entaille. En effet, l'analyse des champs de déformation par corrélation d'image, en accord avec les résultats des simulations numériques, a mis en avant un niveau de déformation totale en fond d'entaille d'autant plus élevé que le facteur K_t est élevé. Ces niveaux de déformation totale sont en effet compris entre 1,1 et 1,4 % pour $K_t = 1{,}38$, et peuvent atteindre une plage de 2,6 et 3,4 % pour $K_t = 2{,}26$. Ainsi, dès les premiers cycles, le volume proche du fond d'entaille est soumis à des déformations très élevées, pouvant potentiellement mener à des amorçages précoces, quel que soit le type de sollicitations (fatigue conventionnelle ou fatigue fluage). De plus, les gradients de déformation et de contrainte sont fortement dépendants du facteur K_t ainsi que du niveau de charge appliqué. Il existe ainsi un volume plus ou moins étendu dans lequel les contraintes locales impliquent une exposition variable à l'effet « dwell » par analogie avec les éprouvettes lisses présentent un champ de contrainte homogène sur l'ensemble du volume utile. Le DFD semble donc dépendre de l'étendue de ce volume. En particulier, les résultats par corrélation d'image ont permis d'observer, dans le cas des abattements les plus sévères sur éprouvettes avec concentrateurs de contraintes, une extension du volume fortement déformé depuis le fond d'entaille vers le centre de l'éprouvette. Au contraire, dans les cas où le DFD est inférieur à 1, le volume fortement déformé évolue peu, comme illustré dans le Tableau 1.

Tableau 1. Champs de déformation en fin de palier de chargement obtenus en cours d'essai pour deux éprouvettes ayant présenté un faible (au-dessus) et un fort (en-dessous) abattement de la durée de vie en fatigue fluage.



En fatigue fluage, les éprouvettes entaillées montrent de nombreux sites d'amorçage surfaciques en fond d'entaille, similaires à ceux observés à l'issue de sollicitations en fatigue conventionnelle. Ils peuvent s'avérer très nombreux dans les cas où les conditions expérimentales sont les plus sévères (K_t et σ_{net}^{max} élevés). En effet, pour un essai de fatigue fluage où $K_t = 2{,}26$ et $\sigma_{net}^{max} = 95\%\ Rp^{0.2\%}$, 26 sites d'amorçage sont comptabilisés en fond d'entaille. Cependant, et malgré une absence parfois totale d'abattement de la durée de vie, l'ensemble des éprouvettes entaillées présentent des zones facettées avec un amorçage interne des fissures lorsque soumises à un chargement de fatigue fluage. Ces dernières, bien qu'à une distance réduite du fond d'entaille, typiquement inférieure à 2 mm, semblent similaires à celles observées sur les éprouvettes lisses. Ainsi, elles semblent associées à une facette lisse d'amorçage, dont émane un ensemble de facettes de propagation. Ces régions se limitent parfois à la seule facette lisse d'amorçage, mais peuvent également s'étendre sur une surface de l'orde du mm². Des analyses EBSD ont permis de confirmer que ces régions internes sont toujours associées à des macrozones où les nodules présentent un axe <c> préférentiellement aligné avec la direction de sollicitation. Cependant, ce constat n'est pas toujours fait avec les sites d'amorçages surfaciques. En effet, plusieurs sites d'amorçage en fond d'entaille sont liés à des macrozones où l'inclinaison prononcée des axes <c> suggère une activité plastique plus intense.

4 Conclusions

Des essais de fatigue conventionnelle et de fatigue fluage sur des éprouvettes lisses et entaillées ont été effectués sur un alliage TA6V à microstructure nodulaire. L'étude du comportement de référence du matériau avec des éprouvettes lisses a montré une réduction sgnificative de la durée de vie liée à l'effet « dwell », qui apparaît avec l'introduction d'un maintien à charge maximale. Quelles que soient les conditions expérimentales, une réduction significative de l'abattement de la durée de vie en fatigue fluage a été mis en évidence en présence de concentrateurs de contraintes. Malgré des durées de vies similaires avec et sans maintien en charge, des caractéristiques typiques de l'effet « dwell » ont été observées sur les faciès de rupture de l'ensemble des éprouvettes entaillées sujettes à un chargemeent de fatigue fluage. Ces zones facettées internes s'ajoutent à la présence de nombreux sites d'amorçages surfaciques en fond d'entaille, caractéristiques de la fatigue conventionnelle. D'après l'analyse des champs mécaniques caractérisés expérimentalement et évalués par des simulations numériques, il semble exister un lien entre l'état mécanique induit par le concentrateur de contrainte et l'ampleur de l'effet « dwell » sur éprouvettes entaillées. Des analyses sont en cours pour relier quantitativement les états de contrainte et de déformation locaux au comportement du matériau sous un chargement de fatigue fluage, et consolider la compréhension des mécanismes d'amorçage et de propagation des fissures sous sollicitations de fatigue fluage. Mieux comprendre cette atténuation de l'effet « dwell » présente un intérêt évident pour les applications industrielles, qui motive la définition d'un critère simple de dimensionnement des pièces avec concentrateurs de contrainte.

Références

1. I. Inagaki, Y. Shirai, T. Takechi, et N. Ariyasu, *Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry* (2014)
2. G. Lütjering, J.C. Williams, *Titanium Second Edition* , Springer (2007)
3. C. Lavogiez, C. Dureau, Y. Nadot, P. Villechaise, et S. Hémery, *Crack Initiation mechanisms in Ti-6Al-4V subjected to cold dwell-fatigue, low-cycle fatigue and high cycle loadings*, Acta Materialia (2023)
4. M.R. Bache, M. Copet, H.M. Davies, W. J. Evans, et G. Harrison, *Dwell sensitive fatigue in a near alpha titanium alloy at ambient temperature*, Int J. Fatigue (1997)
5. P.O. Tympel, T. C. Lindley, E. A. Saunders, M. Dixon, et D. Dye, *Influence of complex LCF and dwell load regimes on fatigue of Ti-6Al-4V*, Acta Materialia (2016)
6. G.K. Haritos, T. Nicholas, et D. B. Lanning, *Notch size effects in HCF behavior of Ti-6Al-4V*, Int, J. Fatigue (1999)
7. G. Pluvinage, *Fracture and Fatigue Emanating from Stress Concentrators,* Springer (2003)
8. J Blaber, B Adair, and A Antoniou, *Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software*, Experimental Mechanics (2015)
9. J.L. Chaboche, *Constitutive equations for cyclic pasticity and cyclic* viscoplasticity, Int. J. Fatigue (1989)