

MODELISATION DE LA PROPAGATION DE FISSURE EN FATIGUE PAR UNE APPROCHE LOCALE DE LA RUPTURE

Olivier Voreux^a, Serge Kruch^a, Sylvia Feld-Payet^a, Pascale Kanouté^a, Noémie Rakotomalala^b

^a DMAS, ONERA, Université Paris-Saclay, F-92322 Châtillon - France ; olivier.voreux@onera.fr ;

^b Safran Tech, Groupe Safran, Rue des Jeunes Bois, Châteaufort CS 80112, 78772 Magny-les-Hameaux Cedex - France

Résumé

Cette étude, menée à l'ONERA, vise à prédire la vitesse et les anomalies de fissuration dans les superalliages base Nickel employés dans les zones chaudes des turbines aéronautiques. Dans ce but, un modèle de propagation de fissure incrémental en temps via un endommagement de fatigue couplé au comportement élasto-visco-plastique du matériau est développé à l'aide d'une approche locale de la rupture. Afin de prendre en compte des phénomènes complexes observés en pointe de fissure, un endommagement de fluage et un endommagement ductile seront également considérés. Une régularisation du modèle via une approche non-locale garantira sa robustesse lors de calculs par éléments finis.

Mots-clés : fatigue ; fluage ; ductilité ; fissuration ; mécanique de l'endommagement ; approche locale ; superalliage base Nickel ; modèle incrémental ; propagation ; élasto-visco-plasticité cyclique ; régularisation.

1 Introduction

Les disques des turbines haute-pression des moteurs aéronautiques sont généralement fabriqués à l'aide de superalliages base Nickel (Inconel 718, Udimet 720, N18, ou encore l'AD730TM, support de notre étude), ceci afin de résister au chargement et à la température élevée présents dans les parties chaudes. Leur dimensionnement en fatigue oligocyclique et en résistance à l'éclatement est donc l'enjeu premier des motoristes. Cependant, en cas d'amorçage d'une fissure dans ces pièces critiques, on souhaite connaître le mode de propagation du défaut, sa vitesse, sa direction, et le nombre de cycles résiduels avant rupture. Dans ce cas précis, la Mécanique Linéaire de la Rupture basée sur des approches énergétiques dans le domaine de comportement linéaire (élastique) du matériau atteint ses limites. En effet, des phénomènes non-linéaires interviennent au-delà de la pointe de fissure et ne permettent alors plus de considérer la structure comme globalement élastique. Il faut donc une méthodologie plus adaptée permettant de tenir compte de la redistribution des contraintes engendrée par l'écoulement plastique et l'endommagement en avant de la fissure, à savoir une **approche locale** de la rupture.

2 Approche incrémentale pour la fatigue oligocyclique

Dans cette étude, on propose un modèle phénoménologique d'endommagement pour étudier la propagation de fissure en fatigue de façon incrémentale en temps. Ce type de modèle permet de s'affranchir d'une quelconque dépendance cyclique et de la définition même d'un cycle de chargement, ceci étant particulièrement approprié dans le cas de cycles de chargement complexes (amplitudes variables, surcharges, temps de maintien...).

On se base ici sur une description macroscopique du comportement non-linéaire fortement couplé à l'endommagement isotrope de fatigue en faisant appel aux outils de la Thermodynamique des Processus Irréversibles et à la Mécanique de l'Endommagement Continu [1]. Le modèle incrémental pour la fissuration rend compte des effets de contrainte moyenne, aspect important lors des calculs de durée de vie des pièces sous sollicitations cycliques. Il traduit également la non-linéarité du cumul des dommages généralement observée en fatigue. En complément, une modélisation de l'aspect quasi-unilatéral est également considérée de sorte à traduire la restauration partielle des propriétés mécaniques du matériau lors de passages en compression (refermeture des défauts) [1, 2].

Visant des applications turbomachines, on se propose de rendre compte dans le modèle d'endommagements additionnels liés à des phénomènes agissant de manière simultanée avec la fatigue, à savoir la ductilité et le fluage. La modularité du modèle passe alors par l'étude des interactions entre ces phénomènes détériorant à l'aide de couplages pertinemment choisis au regard des essais expérimentaux réalisés.

3 Endommagements ductile et de fluage

Les superalliages base Nickel, ductiles, peuvent alors contenir des cavités dans les zones plastifiées, et ce, avant la rupture finale de la pièce. On propose dans ce travail de considérer la modélisation des écrouissages mixtes non-linéaires représentatifs du comportement matériau avec un effet de compressibilité plastique induite par l'endommagement. Cet aspect se rapproche des modèles d'endommagement micro-mécaniques (type Gurson) tenant compte de la fraction volumique de cavités. Cela passe par l'introduction d'une nouvelle variable d'endommagement "volumique" dans la fonction d'écoulement plastique et dans le potentiel de dissipation, renforçant le caractère fort du couplage comportement-endommagement [2]. Cette compressibilité plastique permet à la fois de rendre compte de la croissance de cavités ductiles, mais également de la croissance de cavités aux joints de grains lors de chargements de type fluage à haute-température. En complément de cela, une variable d'endommagement associée au fluage est également prise en compte pour traduire les effets des temps de maintien sur la dégradation des propriétés du matériau. Une prise en compte des effets liés aux mécanismes d'oxydation sera éventuellement envisagée dans la suite des travaux afin de traduire l'interaction entre le matériau et son environnement de fonctionnement agressif à haute température (fragilisation aux joints de grains).

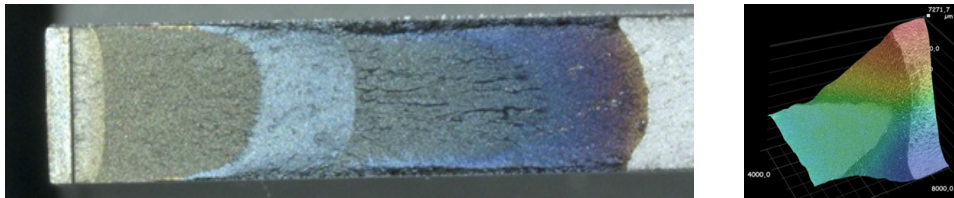


FIGURE 1 – Perturbation du front de fissure sous temps de maintien et son déversement [3]

4 Conclusion

Un modèle incrémental d'endommagement fortement couplé au comportement élasto-visco-plastique cyclique du matériau est ici proposé afin d'étudier la propagation d'une fissure. L'intégration temporelle des équations constitutives couplées à l'endommagement permet d'étudier des trajets de chargement plus ou moins complexes et aléatoires. Plusieurs phénomènes dissipatifs sont pris en compte, à savoir l'énergie stockée par écrouissages (cinématiques et isotropes) et les phénomènes de restitution d'énergie par endommagement (fatigue, ductile et fluage) [1]. Le modèle rend compte des effets de contrainte moyenne en fatigue et permet de coupler différents mécanismes d'endommagement intervenant dans la détérioration des propriétés mécaniques du matériau.

Il sera par la suite régularisé via une approche non-locale de sorte à résoudre le problème de dépendance à la discrétisation dans les calculs par éléments finis. Une fois la zone endommagée connue, on insérera la fissure dans le maillage et on utilisera des outils de remaillage et de transfert de champs [4].

Enfin, des essais expérimentaux vont permettre de vérifier la validité du modèle sous chargements complexes et de définir des critères locaux traduisant les anomalies de fissuration observées sur les superalliages base Nickel (voir Figure 1).

Références

- [1] J. Lemaitre, R. Desmorat. *Engineering Damage Mechanics : Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures Springer-Verlag, Berlin, 2005.*
- [2] K. Saanouni. *Damage Mechanics In Metal Forming : Advanced Modeling and Numerical Simulation John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2013.*
- [3] E. Fessler. *Étude des interactions fatigue-fluage-environnement lors de la propagation de fissure dans l'Inconel 718 DA, Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2017.*
- [4] S. Feld-Payet. *Amorçage et propagation de fissures dans les milieux ductiles non locaux, Thèse, École Normale Supérieure des Mines de Paris, 2010.*