

Critère Unifié pour la modélisation de l'endurance en fatigue sous chargement combiné statique et vibratoire

B. Bholah^{a,b}, S. Pommier^a, Y. Guilhem^a, J. Jaravel^b

a. LMT, ENS Paris-Saclay/CNRS/Université Paris Saclay

bholah@lmt.ens-cachan.fr

sylvie.pommier@universite-paris-saclay.fr

yoann.guilhem@ens-cachan.fr

b. Safran Helicopter Engines

julien.jaravel@safrangroup.com

Résumé

Les pales de compresseur dans un turbomoteur sont soumises à des sollicitations de fatigue complexe dues à la superposition des chargements statiques et dynamiques. Les méthodes justificatives pour la tenue vibratoire des composants aéronautiques basées sur une approche de type « point-chaud » se révèlent d'être trop conservatives dès lors que de forts gradients de contraintes sont présents. Or, la propagation d'une microfissure initiée dépend du champ de contraintes au voisinage. Le but de ce travail est d'enrichir la méthodologie de calcul de criticité vibratoire de ces composants autour d'une singularité en prenant en compte les gradients de sollicitations pour en extraire des quantités de la mécanique de la rupture. L'outil proposé sera implémenté dans un contexte industriel.

Mots clés : Fatigue ; Microfissure ; Point-Chaud ; Gradients de contraintes ; critère.

1. Introduction

En général, les causes de gradient de contraintes dans une structure sont principalement dues à sa géométrie, les chargements appliqués et l'état de surface. Dans un premier temps, nous allons nous consacrer principalement aux deux premiers facteurs mentionnés. Les essais réalisés en laboratoire démontrent que le seuil d'endommagement et la Durée de vie (DDV) dépendent de la géométrie et plus particulièrement du taux de décroissance de la contrainte depuis le point le plus sollicité. Cela nous confirme qu'on ne peut pas fonder nos critères pour la prédiction du risque de rupture et DDV sur des éprouvettes classiques à partir desquelles on fait l'extrapolation sur les géométries complexes.

2. Modélisation de DDV

2.1. Effet d'échelle

Dans le contexte de la modélisation de DDV d'une structure ayant des forts gradients de contraintes, l'effet d'échelle et de gradient représentent toujours un problème majeur. Le premier effet nous initie à utiliser des critères de fatigue basés sur des approches probabilistes [1], pour calculer le risque d'amorçage autour d'une anomalie éventuelle ou

dans l'absence d'une telle singularité, l'approche des distances critiques est envisagée [1,2]. Par contre la difficulté principale des modèles non-locaux de fatigue réside dans la méthodologie à retenir pour la détermination de l'amplitude temporelle d'une contrainte évoluant dans un espace défini par exemple dans le cas d'un chargement combiné : statique et vibratoire.

2.2. Effet de gradient

Comme mentionné plus haut, les quantités pertinentes pour déterminer la ténacité d'une pièce sont les contraintes au voisinage et non uniquement les contraintes locales. Des auteurs comme [3] prévoient de corriger les critères de fatigue basés sur les contraintes locales en ajoutant un terme correctif. Une méthode plus légitime est de se placer dans le cadre de la mécanique de la rupture (MLR) en formulant les conditions d'arrêt de fissure [4]. Ceci nous permet d'intégrer plus facilement les aspects probabilistes mais la MLR n'est pas applicable au cas des fissures courtes et l'implémentation dans un calcul éléments finis est très lourd compromettant ainsi l'exploitation dans un contexte industriel.

Nous constatons très vite que les modèles probabilistes, par conséquent, l'hypothèse du maillon faible ne s'applique pas dans des cas où les fissures peuvent s'arrêter du au gradient de contraintes lors d'un chargement vibratoire alors que ce dans un cas de chargement statique menant à un champ plus au moins uniforme l'hypothèse du maillon faible tient. Il est donc souhaitable de s'appuyer sur une méthode unifiée qui reste valide que l'arrêt de fissure soit possible ou non.

3. Méthodologie

La méthodologie envisagée peut être exprimé en trois étapes initiales : identifications, représentations et utilisations. Lorsque le gradient est fort, le nombre de degrés de liberté utiles pour représenter le champ mécanique au voisinage des points critiques restera limité car les contraintes dans l'espace avoisinant décroissent. En conséquence, on peut décrire le champ de contraintes sous une forme d'une somme de termes exprimés chacun comme le produit d'un facteur d'intensité, qui dépend des chargements macroscopiques appliqués à l'ensemble et d'une fonction de forme, qui est liée à l'état du chargement autour d'un point critique, par exemple Figure 1.

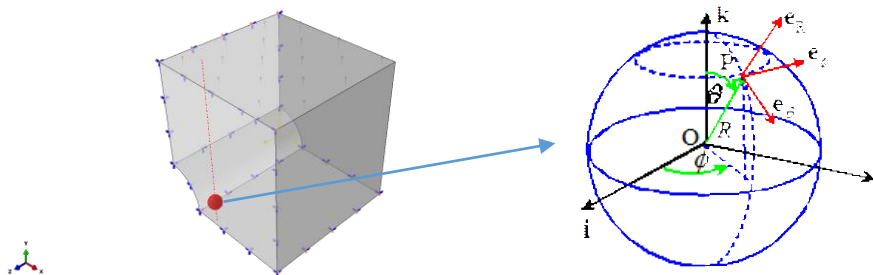


Figure 1. Post traitement du champ de contraintes autour d'un point chaud.

Ces fonctions de forme (pour chaque famille de problème) seront utilisées pour établir une base contenant les informations des quantités de la MLR qui permettra aux industriels d'avoir une appréhension de la mécanique physique de l'initiation et non-propagation des microfissures dans différentes configurations sur des géométries complexes sans faire des calculs coûteux.

Pour cela, on réduira d'abord le champ mécanique par la méthode de décomposition Karhunen-Loève ce qui permettra la mise en place des méthodes calcul des amplitudes de contraintes non-locales – choisir un nombre de modes représentatifs du problème – représenter ces modes sur un diagramme polaire – identifier des fonctions analytiques et/ou numériques – calculer les quantités de MLR pour ces formes – construire une base – faire une étude de sensibilité sur les différentes configurations de fissures qui seront subséquemment les données d'entrées d'un critère de non propagation de fissures.

4. Perspectives

Les travaux de Frank Morel et son équipe [5] montrent que le régime « fissures courtes » est sensible au type de chargement appliqué contrairement au régime « fissures longues » où seule la contrainte principale maximale est pertinente. Les thèses de Rami Hamam [6], d'Emmanuelle Thieulot-Laure [7], de Raül de Moura-Pinho [4,8] et de François Brugier [9,10] ont mis en évidence que la multiaxialité du chargement peut être prise en compte dans un critère de mécanique de la rupture, en mode I, en intégrant dans un critère de propagation par fatigue le facteur d'intensité des contraintes KI ainsi que les termes non-singuliers de la solution de Westergaard, à savoir les contraintes T et Tz.

Dans le cas d'une fissure plane à front droit, la contrainte T est l'écart entre la contrainte à l'infini normale au plan de fissuration et la contrainte parallèle au plan de la fissure et normale au front, la contrainte Tz est parallèle au plan de fissure et au front de fissure. Comme KI tend vers zéro lorsque la dimension de la fissure diminue, les contraintes T et Tz, indépendantes de la longueur de la fissure, finissent par dominer dans le domaine des fissures courtes, ce qui permet de formuler un critère unifié cohérent avec les résultats observés expérimentalement. Ce critère pourront être étendu au cadre multiaxial, en s'appuyant notamment sur les travaux de Pierre-Yves Decreuse [11] et Flavien Fremy [12].

Remerciements

Les auteurs remercient Safran Helicopter Engines pour le support apporté à cette étude ainsi que pour les échanges ayant mené à la construction de ce projet.

Références

- [1] D. Taylor, The theory of critical distances, Eng. Fract. Mech. 75 (2008) 1696–1705. doi:10.1016/j.engfracmech.2007.04.007.
- [2] A. Carpinteri, A. Spagnoli, S. Vantadori, D. Viappiani, A multiaxial criterion for notch high-cycle fatigue using a critical-point method, Eng. Fract. Mech. 75 (2008) 1864–1874. doi:10.1016/j.engfracmech.2006.11.002.

- [3] I.V. Papadopoulos, V.P. Panoskaltsis, Invariant formulation of a gradient dependent multiaxial high-cycle fatigue criterion, *Eng. Fract. Mech.* 55 (1996) 513–528. doi:10.1016/S0013-7944(96)00047-1.
- [4] R. de Moura Pinho, S. Pommier, C. Mary, A. Longuet, F. Vogel, A novel methodology to predict the endurance domain for a material and its evolution using a generalized fracture mechanics framework, *Int. J. Fatigue*. 42 (2012) 183–193. doi:10.1016/j.ijfatigue.2011.10.011.
- [5] E. Pessard, D. Bellett, F. Morel, I. Koutiri, A mechanistic approach to the Kitagawa–Takahashi diagram using a multiaxial probabilistic framework, *Eng. Fract. Mech.* 109 (2013) 89–104. doi:10.1016/j.engfracmech.2013.06.001.
- [6] R. Hamam, Simulation de la propagation des fissures par fatigue dans les toiles des roues de train sous chargement à amplitude variable, Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2006. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00133413/document> (accessed June 14, 2016).
- [7] E. Thieulot-Laure, Méthode probabiliste unifiée pour la prédiction du risque de rupture en fatigue, Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2008. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01199575/document> (accessed June 14, 2016).
- [8] R. De Moura Pinho, Modélisation de l'endurance en fatigue sous chargement complexe, statique et vibratoire, Thèse en cours de rédaction, ENS Cachan, 201X.
- [9] F. Brugier, Propagation des fissures courtes par fatigue sous chargement variable : traitement de la micro-fissuration dans le modèle incrémental et implémentation des couplages via X-FEM, Thèse en cours de rédaction, ENS Cachan, 201X.
- [10] F. Brugier, S. Pommier, R. de M. Pinho, C. Mary, D. Soria, A novel approach to predict the growth rate of short cracks under multiaxial loadings, in: ICMFF10, 2015. <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICMFF/ICMFF10/paper/view/12123> (accessed June 24, 2016).
- [11] P.-Y. Decreuse, Fissuration en mode mixte I+II non proportionnel : approche expérimentale et modélisation de la plasticité, Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2010. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00561842/document> (accessed June 14, 2016).
- [12] F. Frémy, Fissuration par fatigue en mode mixte I+II+III non proportionnel dans l'acier 316L : approche expérimentale et modélisation des effets de la plasticité, Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2012. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00826964/document> (accessed June 14, 2016).