Sujet de thèse

Centre des Matériaux Mines ParisTech - Safran Helicopter Engines

Titre : **Détection et simulation des modes d'instabilités plastiques des disques de turbine en rotation (intégrité rotor)**

Encadrement : J. Besson, S. Forest, M. Mazière (CdM), H. Chalons (SHE)

Lors du développement de turbomachines aéronautiques, les motoristes sont tenus par la réglementation de démontrer l'intégrité des pièces tournantes par essai ou par analyse. Ainsi, les disques de compresseurs et de turbines doivent supporter l'effet des niveaux de vitesse de rotation et de température imposés par la réglementation. Cette exigence permet de garantir la marge de sécurité requise entre la vitesse d'éclatement des rotors et les différentes conditions de fonctionnement (normales et cas de panne).

Les conditions de fonctionnement des matériaux utilisés, proche de 500°C pour les disques de turbine, font que ceux-ci sont susceptibles d'être soumis à des instabilités de type Portevin−Lechatelier (PLC). Ces instabilités sont relativement bien comprises à l'échelle des dislocations [Ref. 1] et des modèles de comportement élasto-thermo-viscoplastiques en grandes déformations ont été développés par différents auteurs [Ref. 2] [Ref. 3] & [Ref. 4], et étudiés et identifiés dans une thèse préalable pour un matériau intéressant Safran Helicopter Engines [Ref. 5] & [Ref. 6]. Des simulations par éléments finis ont également été réalisées en utilisant ces modèles. Ces simulations ont pour objectif une prévision fiable de la vitesse d'éclatement par analyse limite [Ref. 5]. Les résultats obtenus à ce jour ne sont pas au niveau de prédiction attendu et surestiment cette vitesse.

Suite à ces résultats, des recherches ont été conduites [Ref. 7] dans le but de développer un modèle d'amorçage de l'endommagement et de la rupture sous chargement multiaxial. Le développement de techniques avancées d'analyse d'image réalisées sur des essais de traction sur éprouvettes entaillée [Ref. 8] ont permis d'identifier de manière robuste le comportement de matériaux base Ni et Ti au-delà des niveaux de plasticité provoquant la striction sur des éprouvettes lisses. Un critère de rupture a également été proposé et doit être confirmé en température et sur les géométries de disques. Des avancées ont également été obtenues sur la simulation de la rupture par éléments finis en utilisant des méthodes de résolution explicites. Par ailleurs, les travaux en cours sur les aciers [Ref. 9] & [Ref. 10] ont permis des progrès notables sur la prévision d'instabilités locales ou globales ainsi que sur la prévision du comportement et de la rupture sous chargement ultime sur des composants de trains d'atterrissage ou d'arbre de puissance.

L'enjeu de cette thèse est de définir un critère de rupture local ou un ensemble de critères dont l'atteinte combinée mènerait à la rupture pour trois super-alliages base nickel (Inco 718, Udimet 500 et Udimet 720), valide à température ambiante et en température (500-600°C), avec des niveaux de triaxialité comparables à ceux rencontrés sur les rotors. La mise en œuvre de ces critères nécessitera d'identifier des lois de comportement à des niveaux de déformation plus élevés que les courbes traditionnellement obtenues sur éprouvettes lisses, limitées en déformation par les effets éventuels de localisation. La sensibilité du critère de plasticité des matériaux étudiés à la triaxialité sera également analysée.

L'effet PLC ainsi que des effets de viscoplasticité pourront être rencontrés lors des essais. Il faudra pouvoir tenir compte de ces effets dans l'exploitation des résultats. Dernier objectif et non des moindres, on cherchera à définir une procédure de vérification du critère de rupture à partir d'une ou

plusieurs éprouvettes faiblement instrumentées, applicables dans des conditions de contrôle en production.
Ces résultats seront confrontés à des résultats d'essais d'éclatement réalisés sur des disques de turbomachine.

La démarche proposée consiste d'abord à compléter la base expérimentale d'identification des lois de comportement et d'endommagement, notamment à l'aide d'éprouvettes entaillées de différents rayons. La méthode d'identification basée sur une analyse DIC réduite [Ref. 10] pourra être utilisée pour compléter les calibrations déjà réalisées sur certains des matériaux considérés (U720, U500). Le choix du critère de plasticité est particulièrement important en vue de la prévision d'instabilités plastiques (notamment les surfaces de plasticité présentant des coins ou une courbure importante). Les effets de vitesses de déformation seront également étudiés expérimentalement.

Le comportement à chaud des trois alliages considérés est caractérisé par l'effet Portevin-Le Chatelier qui se manifeste par la propagation de bandes de localisation de la vitesse de déformation. Le modèle de viscoplasticité intégrant les effets de viellissement dynamique, déjà identifié pour U720, sera étendu aux autres alliages. Sa validité sera étendue grâce à des essais en température avec mesures de champs en traction unixiale ainsi qu'en biaxial.

Les critères globaux et locaux les plus récents seront utilisés pour détecter d'une part les instabilités plastiques avant-coureurs et la rupture. Les critères globaux concernent la détermination des modes propres de la matrice tangente globale dans le contexte élasto-plastique [Ref. 9] à étendre au cas élasto-viscoplastique. Les critères locaux concernent la détection des modes de localisation de la déformation plastique (bandes de cisaillement au sens larges), des bandes de Portevin-Le Chatelier et amorçage de la rupture.

Les critères de rupture non couplés (cf. [Ref. 10]) et couplés (Gurson vs. Coulomb suivant le mode de rupture) seront envisagés de manière complémentaires. L'influence de l'effet PLC qui contribue à des modes de rupture en biseau [Ref. 11] sera intégrée dans ces critères. La simulation régularisée de ces modes de rupture localisés sera également considérée pour garantir des prévisions objectives.

[Ref. 1] Cottrell, A.H., 1953a. A note on the Portevin–Le Chatelier effect. Phil. Mag. (seventh series) 44 (335), 829–832.

[Ref. 2] Kubin, L.P., Chihab, K., Estrin, Y., 1988. The rate dependence of the Portevin–Le Chatelier effect. Acta Metall. 36 (10), 2707–2718.

[Ref. 3] P. MacCormick, Theory of flow localisation due to dynamic strain ageing, Acta Mater. 36 (1989) 3061–3067

[Ref. 4] Benallal, A., Berstad, T., Børvik, T., Clausen, A.H., Hopperstad, O.S., 2006. Dynamic strain aging and related instabilities: experimental, theoretical and numerical aspects. Eur. J. Mech. – A/Solids 25, 397–424.

[Ref. 5] M. Mazière, Eclatement des disques de Turbomachines, Matthieu Mazière, Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2007

[Ref. 6] M. Mazière, J. Besson, S. Forest, B. Tanguy, H. Chalons, F. Vogel, Overspeed burst of elastoviscoplastic rotating disks – part I: analytical and numerical stability analyses, Eur. J. Mech. – A/Solids 28 (2009) 36–44.

[Ref. 7] D. Lindner, Vers la prévision de la rupture de disque de turbomachine: apport de la corrélation d'image numérique, Doctorat de l'ENS Cachan/Paris Saclay, 2016

[Ref. 8] D. Lindner, F. Mathieu, F. Hild, O. Allix, C. H. Minh et O. Paulien-Camy, On the Evaluation of Stress Triaxiality Fields in a Notched Titanium Alloy Sample Via Integrated Digital Image Correlation – J. Appl. Mech. 82(7), 071014 (Jul 01, 2015)

[Ref. 9] M. Al Kotob, Compétition entre modes d'instabilités élastoplastiques diffus et localisés dans les matériaux élastoplastiques, thèse Mines ParisTech, SafrantTech, 2018.

[Ref. 10] C. Defaisse, Critère de rupture multiaxial pour un acier aéronautique à très haute résistance, thèse Mines ParisTech, SafranTech, 2018.

[Ref. 11] S. Ren, Mesures de champs et simulations par éléments finis de l'interaction entre vieillissement et endommagement dans les alliages métalliques, thèse Mines ParisTech, 2018.