

Modélisation multi-échelle de l'endommagement du système barrière thermique AM1/(Ni,Pt)-Al/YPSZ sous sollicitation thermique

Société partenaire : Safran Tech

Lieu du stage : Centre des Matériaux et Safran Tech

Encadrants : Lionel Marcin, Florent Coudon (Safran Tech), Vincent Maurel, Vincent Guipont (Mines ParisTech)

Mots-clés : barrière thermique, endommagement interfacial, fatigue thermo-mécanique, écaillage, vieillissement, oxydation

Contexte de l'étude

Les barrières thermiques sont largement utilisées par Safran Aircraft Engines pour les structures chaudes des turbines aéronautiques. Pour le cas d'une aube mobile Haute Pression, la combinaison des canaux de refroidissement avec ce revêtement protecteur permet un abattement considérable de la température maximale perçue par le substrat (AM1). Dans l'objectif de soumettre ces structures à des températures toujours plus élevées, il est crucial d'intégrer la dégradation du revêtement barrière thermique explicitement dans la prévision de la durée de vie des structures. Plusieurs mécanismes entraînent la ruine du système multi-couche. Premièrement, l'environnement extérieur conduit à un écaillage partiel ou total de la couche de céramique par corrosion (CMAS) ou par vieillissement (impact de particules, frittage,...). D'autre part, il y a une perte d'adhérence aux interfaces entre une couche d'oxyde évoluant au cours du chargement et la céramique et/ou la sous-couche. Afin d'évaluer la tenue des interfaces, un modèle d'écaillage du système barrière thermique complet a été proposé par (Courcier et al., 2011) puis enrichi par (Sallot, 2012; Soullignac, 2014). L'aspect pragmatique du modèle permet d'avoir un temps de calcul raisonnable en vue d'une application industrielle.

L'évolution microstructurale du système barrière thermique à proximité de la couche d'alumine est complexe. Il fait intervenir des phénomènes physiques se déroulant indépendamment dans chaque couche du système (la céramique, la couche d'oxyde, la sous-couche et le substrat) mais également en interaction entre celles-ci. Plusieurs mécanismes coexistent (transformations de phase dans la sous-couche, augmentation de l'épaisseur de la couche d'oxyde, évolution des rugosités aux interfaces,...) générant des états de contraintes conduisant à un endommagement local. L'évolution de cet endommagement conduit à terme à un écaillage macroscopique de la barrière thermique. De nombreux mécanismes ont été identifiés et des propositions de modélisation ont été faites à cette échelle (Balint and Hutchinson, 2003, 2005; Evans et al., 2001; Karlsson et al., 2002; Maurel et al., 2014; Vaunois et al., 2013).

Objectifs du projet

A partir des résultats expérimentaux capitalisés au cours des thèses précédentes et des essais d'oxydation cycliques réalisés à Safran Tech, le travail consiste à modéliser l'évolution de la couche d'oxyde à plusieurs températures. D'une part, nous nous intéresserons à l'évolution de l'épaisseur d'oxyde mais aussi à sa répartition (épaisseur homogène ou localisée dans des zones endommagées). Ensuite, des analyses d'images doivent permettre de quantifier la rugosité d'interface à partir des essais d'oxydation cycliques réalisés pour différentes températures maximales de maintien et fréquences de cyclage. L'objectif final est de voir si le modèle développé au Centre des Matériaux suffit pour prévoir l'endommagement des interfaces ou s'il est nécessaire d'introduire explicitement d'autres mécanismes (pris en compte de l'influence de la rugosité, couplages mécaniques entre les couches, ...). Les analyses numériques pourront être alimentées par des calculs EF pour des rugosités synthétiques 3D obtenues à l'aide d'observations expérimentales (Maurel et al., 2014) afin de comprendre les redistributions de contraintes locales.

Programme de travail

Premier semestre : Etude bibliographique portant sur 1) les techniques expérimentales et les techniques d'analyse d'images permettant d'estimer les évolutions microstructurales en cours de vieillissement. On cherchera également à hiérarchiser l'impact de ces évolutions sur la durée de vie à l'amorçage et sur la vitesse de propagation d'une fissure d'interface, 2) les modélisations de l'évolution de microstructure en condition d'utilisation (oxydation et changement de phase) et 3) les modèles de durée de vie existants en précisant leurs domaines d'application au travers de l'analyse des mécanismes d'endommagement et des types de chargement pris en compte (isotherme, anisotherme, prise en compte ou pas de l'effet des gradients). Cette étude bibliographique sera complétée par l'analyse de cas de calcul réalistes sur des modèles existants de type post-processeur.

Deuxième semestre :

L'analyse des observations des évolutions microstructurales issues de la base d'essai en oxydation cyclique servira à l'identification des cinétiques d'oxydation et d'endommagement. La comparaison des principaux modèles issus de l'analyse bibliographique, des modèles simplifiés (eg post-processeur) aux modèles fortement couplés (eg des modèles de type zones cohésives ou à champs complets) sera alors effectuée pour apprécier les limites effectives de ces modèles et les besoins d'amélioration aux vues des sollicitations connues sur pièce.

En fonction de l'avancée des travaux, une étude expérimentale complémentaire pourra être entreprise : il s'agit d'analyser les conditions de propagation de fissure pour des éprouvettes préalablement délaminées localement par choc laser. En effet, l'utilisation d'une éprouvette pourvue d'un délaminage interfacial dont la taille et la localisation sont connues, permet d'estimer facilement la propagation de fissure pour des conditions de mixité modale variées.

Profil demandé

de solides connaissances en calculs aux éléments finis et un gout prononcé pour l'analyse expérimentale et en particulier l'analyse d'images font partis des prérequis.

Bibliographie

- Balint, D.S., Hutchinson, J.W., 2005. An analytical model of rumpling in thermal barrier coatings. *J. Mech. Phys. Solids* 53, 949–973. doi:10.1016/j.jmps.2004.11.002
- Balint, D.S., Hutchinson, J.W., 2003. Undulation instability of a compressed elastic film on a nonlinear creeping substrate. *Acta Mater.* 51, 3965–3983. doi:10.1016/S1359-6454(03)00221-0
- Courcier, C., Maurel, V., Rémy, L., Quilici, S., Rouzou, I., Phelippeau, A., 2011. Interfacial damage based life model for EB-PVD thermal barrier coating. *Surf. Coat. Technol.* 205, 3763–3773. doi:10.1016/j.surfcoat.2011.01.008
- Evans, A.G., Mumm, D.R., Hutchinson, J.W., Meier, G.H., Pettit, F.S., 2001. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings. *Prog. Mater. Sci.* 46, 505–553. doi:10.1016/S0079-6425(00)00020-7
- Karlsson, A.M., Hutchinson, J.W., Evans, A.G., 2002. A fundamental model of cyclic instabilities in thermal barrier systems. *J. Mech. Phys. Solids* 50, 1565–1589. doi:10.1016/S0022-5096(02)00003-0
- Maurel, V., Busso, E.P., Frachon, J., Besson, J., N’Guyen, F., 2014. A methodology to model the complex morphology of rough interfaces. *Int. J. Solids Struct.* 51, 3293–3302. doi:10.1016/j.ijsolstr.2014.04.015
- Sallot, P., 2012. Modélisation de la durée de vie d’un revêtement aluminoforeur en conditions de sollicitations thermo-mécaniques. Thèse de doctorat, Mines ParisTech.
- Sapardanis, H., Maurel, V., Köster, A., Duvinage, S., Borit, F., & Guipont, V. (2016). Influence of macroscopic shear loading on the growth of an interfacial crack initiated from a ceramic blister processed by laser shock. *Surface and Coatings Technology*, 291, 430-443.
- Soullignac, R., 2014. Prédiction de la durée de vie à l’écaillage des barrières thermiques. Thèse de doctorat, Mines ParisTech.
- Vaunois, J.-R., Dorvaux, J.-M., Kanouté, P., Chaboche, J.-L., 2013. A new version of a rumpling predictive model in thermal barrier coatings. *Eur. J. Mech. - A Solids* 42, 402–421. doi:10.1016/j.euromechsol.2013.06.010