

# Influence du cisaillement macroscopique sur la propagation d'une fissure située à l'interface d'un revêtement céramique et d'un substrat métallique

H. SAPARDANIS, V. MAUREL, A. KÖSTER, F. BORIT, S. DUVINAGE,  
V. GUIPONT

MINES ParisTech, PSL - Research University, MAT - Centre des Matériaux,  
CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry Cedex, France

+ [helene.sapardanis@mines-paristech.fr](mailto:helene.sapardanis@mines-paristech.fr)  
+ [vincent.maurel@mines-paristech.fr](mailto:vincent.maurel@mines-paristech.fr)  
+ [alain.koster@mines-paristech.fr](mailto:alain.koster@mines-paristech.fr)  
+ [francois.borit@mines-paristech.fr](mailto:francois.borit@mines-paristech.fr)  
+ [steve.duvinage@mines-paristech.fr](mailto:steve.duvinage@mines-paristech.fr)  
+ [vincent.guipont@mines-paristech.fr](mailto:vincent.guipont@mines-paristech.fr)

## Résumé :

*Les dépôts des revêtements projetés sont le plus souvent réalisés à chaud (jet plasma, faisceau d'électron...) ou avec des chauffements locaux importants au cours du dépôt (cold spray). Lors de l'utilisation des pièces, la température étant généralement différente de la température de dépôt, l'écart de coefficients de dilatation thermique entre les couches du système conduit à un état de contraintes équi-biaxial, pour des couches isotropes, dans le plan de dépôt des couches. Cette sollicitation peut conduire au délaminage interfacial entre substrat et revêtement. De plus, en fonction des applications, la géométrie des pièces, le chargement mécanique ou encore l'anisotropie éventuelle du substrat peuvent introduire un cisaillement non négligeable de l'interface. Les conditions de fissuration d'interface seront alors tributaires de ce chargement macroscopique et de la géométrie locale du front de fissure, voir Hutchinson et al. [1]. De nombreux auteurs ont analysé l'influence des conditions de cisaillement local sur la fissuration des films minces [2]. Nous nous intéressons ici au cas des revêtements céramiques « épais » (épaisseur de plusieurs dizaines de microns) et fragiles largement utilisés comme barrière thermique notamment pour protéger les pièces les plus chaudes des turbomachines (moteurs d'avion ou turbines à gaz).*

*Afin de déterminer expérimentalement les conditions de propagation de fissure d'interface sous sollicitation multiaxiale, nous proposons ici un protocole original permettant i) d'introduire un défaut d'interface de géométrie connue, ii) de le solliciter sous chargement variable et iii) de mesurer in situ l'évolution de ce délaminage. Les défauts d'interface sont introduits par choc laser à l'aide de la méthode LASer Shock Adhesion Test (LASAT) [3] développée initialement pour mesurer l'adhérence des systèmes revêtus. Elle vise, par propagation d'onde de choc, à créer une sur-traction à l'interface du système qui conduit à sa décohésion. Dans le cas des revêtements céramiques blancs poreux d'épaisseur inférieure à 300µm, il a été montré que la présence d'une zone délaminée se traduit par une « tache blanche » observable côté céramique [4]. La taille de la décohésion est maîtrisée grâce aux paramètres laser et observée de manière non destructive par caméra optique.*

Après le choc et sous l'effet de la relaxation des contraintes résiduelles de compression, la céramique produit généralement une cloque liée à son flambage.

*Afin de simplifier l'analyse du système revêtu, nous avons utilisé un système « modèle » composé d'un revêtement céramique directement projeté sur un substrat métallique de propriétés isotropes. Un superalliage à base de cobalt (Haynes 188) est retenu pour le substrat. Une poudre d'alumine pure est choisie pour réaliser le dépôt. Des éprouvettes cruciformes sont utilisées pour réaliser des essais mécaniques sous chargement biaxial. Les surfaces sont préalablement sablées afin d'améliorer l'adhérence du revêtement sur le métal. L'alumine pure est ensuite déposée par projection plasma sur le substrat. Des défauts sont introduits à l'interface alumine/Haynes 188 par choc laser selon la méthode LASAT décrite précédemment. Ils sont caractérisés de manière non destructive par profilométrie 3D et par observation optique en vue de dessus. Les essais mécaniques sont réalisés grâce à une machine de fatigue bi-axiale coplanaire permettant de modifier le cisaillement macroscopique appliqué en modifiant le rapport des déplacements imposés sur chacun des deux axes de sollicitation. Enfin, la propagation de fissure est suivie grâce à une caméra CCD par observation de l'évolution de la « tache blanche » induite par la modification locale des propriétés optiques en présence de fissure d'interface. Ces images sont ensuite analysées afin de déterminer les profils des zones fissurées en fonction du chargement appliqué.*

*Les résultats expérimentaux permettent de qualifier l'influence d'un cisaillement macroscopique sur la propagation de la fissure d'interface ainsi que l'évolution de la morphologie du défaut introduit par choc laser. Dans les cas analysés, le délaminage est initialement circulaire, et conduit au cloquage de la couche céramique, cloque elle-même circulaire et non fissurée après le choc. L'application d'un chargement de cisaillement conduit systématiquement à une perte de circularité de la zone cloquée comme de la zone délaminée. Les résultats numériques obtenus grâce à un modèle de zones cohésives sont comparés avec ces résultats expérimentaux. En particulier, on montre que les formes des zones délaminées obtenues expérimentalement sont liées aux effets d'ouverture et de fermeture du front de fissure, eux mêmes fonctions de la hauteur de flambage de la céramique. L'influence des modes de fissurations en jeu dans la propagation du front d'une fissure initialement circulaire est discutée ainsi que l'influence de la morphologie du défaut initial introduit par choc laser.*

**Mots clefs : Revêtement céramique, essai bi-axial, cisaillement macroscopique, choc laser, LASAT, zones cohésives**

## Références

- [1] J.W. Hutchinson, M.Y. He, and A.G. Evans. The influence of imperfections on the nucleation and propagation of buckling driven delaminations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(4):709-734, 2000.
- [2] B. Audoly Stability of straight delamination blisters, *Physical review letters*, 83(20):4124-4127,1999.
- [3] L. Berthe, M. Arrigoni, M. Boustie, J.P. Cuq-Lelandais, C. Broussillou, G. Fabre, M. Jeandin, V. Guipont, and M. Nivard. State-of-the-art laser adhesion test (LASAT). *Nondestructive Testing and Evaluation*, 26(3-4):303-317, 2011.
- [4] V. Guipont, M. Jeandin, S. Bansard, K. A. Khor, M. Nivard, L. Berthe, J.-P. Cuq-Lelandais, and

M. Boustie. Bond strength determination of hydroxyapatite coatings on Ti- 6Al-4V substrates using the laser shock adhesion test (LASAT). Journal of Biomedical Materials Research Part A, 95(4):1096-1104, 2010.