

Méthodologie d'analyse de l'écaillage d'un système barrière thermique sous sollicitations thermo-mécaniques

Mélanie Theveneau^a, Basile Marchand^a, Vincent Guipont^a, Alexandre Cottin^a, Florent Coudon^b, Vincent Maurel^a

a. MINES ParisTech, PSL Research University, MAT - Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87 91003 Evry : melanie.theveneau@mines-paristech.fr

b. Pôle Matériaux et Procédés (M&P), Safran Tech, Safran SA, Rue des Jeunes Bois, Châteaufort 78772 MagnyLes-Hameaux : florent.coudon@safrangroup.com

Mots clés : Barrière thermique, Défaut, Écaillage, Endommagement, Modélisation, Lasat

1. Introduction

Les systèmes barrières thermiques permettent de protéger et d'utiliser des pièces à des températures plus élevées que la température de fusion du substrat métallique ainsi protégé. Safran a développé un système barrière thermique, notamment pour les aubes de turbine haute pression : le substrat est un superalliage base Ni monocristallin (AM1 bas soufre), la couche céramique est constituée d'une zircone yttrée déposée par faisceau d'électrons EB-PVD sur une sous-couche métallique obtenue par électro-déposition de Pt et diffusion d'Al en phase vapeur, ce qui conduit à un aluminure de nickel modifié platine. Un oxyde dit de croissance (principalement de l'alumine alpha) se forme à l'interface sous-couche/céramique créant ainsi le lien physique entre la sous-couche et la couche céramique (cf. figure 1).

2. Mécanismes d'endommagement du système barrière thermique

Le système barrière thermique vieillit et s'endommage différemment en fonction des sollicitations thermo-mécaniques qui lui sont appliquées. Dans le cas de sollicitations isothermes, l'interdiffusion liée à un déséquilibre de compositions initiales important entre substrat et sous-couche (cf. figure 1) provoque des changements de phase dans la sous-couche et ainsi entraîne son durcissement [5]. L'oxydation de la sous-couche implique un flux de diffusion supplémentaire.

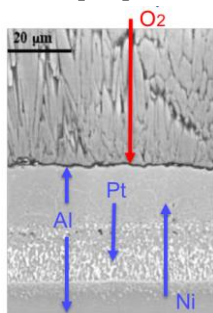


Figure 1 : Flux d'interdiffusion des éléments principaux [3]

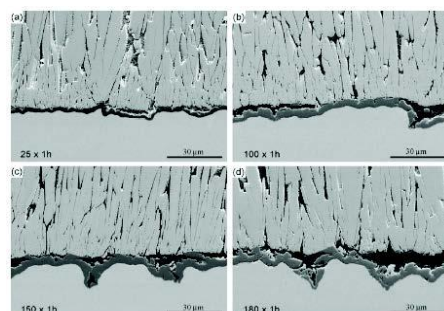


Figure 2 : Phénomène de croissance de l'oxyde, rumpling [9]

Pour des sollicitations anisothermes, le cyclage thermique entraîne une augmentation de la rugosité de l'oxyde de croissance et de la sous-couche (cf. figure 2) ce qui conduit à la rupture progressive de l'interface oxyde/céramique [9]. Ce phénomène dit de rumpling est corrélé à la croissance de l'oxyde et au rochet de la sous-couche, induit principalement par le cumul de déformations plastiques liées aux déformations thermiques différentielles entre couches lors du cyclage.

Ces évolutions de microstructure conduisent à un phénomène progressif de propagation de fissures interfaciales engendrant le délaminage puis l'écaillage du système barrière thermique a été observé [2]. Cette corrélation, même si elle a été établie par de nombreux auteurs pour des systèmes différents, est difficile à quantifier tant les dispersions expérimentales sont importantes pour de tels systèmes. En effet, on favorise des essais de cyclage thermique sur pions qui conduisent à une dispersion dans la durée de vie à l'écaillage qui peut atteindre environ 50% de la durée de vie moyenne observée. Des résultats récents ont montré que l'utilisation d'essais d'adhérence par choc laser (LASAT pour LAsEr Shock Adhesion Test [4]) permet de réduire significativement la dispersion de mesure d'adhérence de différents échantillons [4]. En outre, il est également possible d'introduire un défaut calibré en taille et de localisation choisie dans l'échantillon à l'aide de cette technique [6].

3. Suivi de l'endommagement par introduction d'un défaut calibré par choc laser

Pour suivre l'évolution de l'endommagement du système barrière thermique en fonction de la durée de vieillissement, nous avons mené une campagne de vieillissement par cyclage thermique sur pions associée à une caractérisation de l'adhérence par essai de choc laser.

3.1 Conditions expérimentales de vieillissement

Le système barrière thermique étudié correspond au système Safran décrit succinctement ci-dessus. Les détails de réalisation sont disponibles dans des études précédentes [1, 2, 3, 7, 8]. Les éprouvettes revêtues sont des pions dont le substrat mesure 25 mm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur. La couche céramique mesure environ 150 μm d'épaisseur et n'est déposée que sur une seule face plane du pion et recouvre les bords préalablement chanfreinés.

Les vieillissements étudiés correspondent à deux cycles différents. Le cycle dit standard, réalisé à Safran Tech, est constitué d'une montée en température de 100°C à 1100°C en 10 min, un maintien à température maximale de 1100°C pendant 50 min et un refroidissement de 1100°C à 100°C en 15 min. Le cycle réalisé au Centre des Matériaux est constitué d'une montée en température de 100°C à 1100°C en 5 min, un maintien à température maximale de 1100°C pendant 5 min, un refroidissement de 1100°C à 100°C en 5 min et un maintien à température minimale de 100°C pendant 5 min. Un thermocouple de régulation permet d'assurer le suivi de la consigne de température pour les deux montages.

3.2 Choc laser et méthode de suivi de l'évolution du délaminage interfacial

L'essai LASAT permet ici de qualifier la perte d'adhérence d'un revêtement sur un substrat en fonction du vieillissement subi par les éprouvettes [4]. Il s'agit d'impacter la surface non revêtue d'un échantillon avec un laser de haute énergie (cf. figure 3). Une onde de compression va se propager jusqu'à la surface revêtue et après réflexion sur la surface libre (surface du revêtement) se transformer en onde de traction. Si la contrainte de traction, et donc la puissance laser, est assez élevée, celle-ci peut conduire au délaminage du revêtement par rapport au substrat. La mesure de la zone délaminée peut s'effectuer par contrôle optique direct en mettant à profit le contraste optique induit par la zone délaminée [4]. Nous avons choisi ici de systématiser l'utilisation de la thermographie infra-rouge effectuée sur les échantillons chauffés à 60°C qui permet d'obtenir un contraste net de la zone délaminée (cf. figure 4).

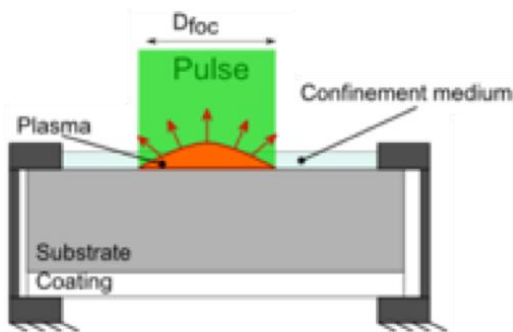


Figure 3 : Schéma du principe LASAT [4]

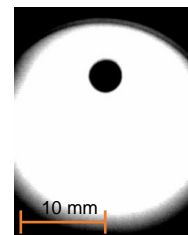


Figure 4 : Observation des échantillons par thermographie infra-rouge

Pour qualifier un revêtement, on peut alors mesurer l'évolution du diamètre délaminé en fonction du flux surfacique induit par le laser (cf. figure 5), qui résulte en ce qu'on qualifie de courbe LASAT 2D [4].

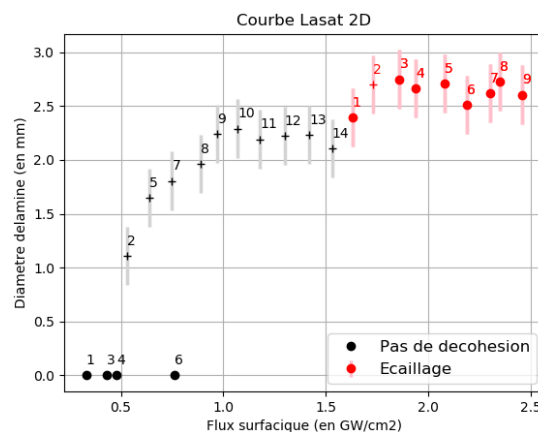


Figure 5 : Courbe LASAT

Pour tracer cette courbe, nous avons impacté deux échantillons avec des énergies croissantes. On constate ainsi que plus l'énergie laser est élevée, plus le diamètre délaminé est important. En outre, en dessous d'une énergie de 0,5 GW/cm² on n'observe aucun délaminage. Il s'agit d'un seuil de non décohésion caractéristique de la qualité du revêtement [4]. Pour une énergie supérieure à 1,7 GW/cm² on observe une relative saturation du diamètre délaminé. Cette saturation est principalement liée à l'écaillage progressif du revêtement.

Établir une telle courbe, implique un grand nombre de chocs ce qui limite son application en terme d'analyse en cours de vieillissement pour un même échantillon. Nous avons donc établi le protocole suivant :

- Réalisation d'un choc à énergie fixée sur chaque pion ;
- Vieillissement des pions et prélèvement de pions à différents nombreS de cycles ;
- Mesure du diamètre délaminé à chaque prélèvement.

Nous avons choisi de fixer le flux surfacique à $1,18 \text{ GW/cm}^2$, valeur pour laquelle on aura dans tous les cas délaminage du revêtement par rapport au substrat, sans provoquer d'écaillage à l'état initial. Ce choc a été appliqué à un lot de 28 échantillons à l'état brut de dépôt. On a alors suivi l'évolution de la taille des zones délaminées en fonction de différentes durées de vieillissement.

3.3 Évolution du délaminage interfacial en fonction du type de cycle

On a tracé sur la courbe figure 7 l'évolution du diamètre délaminé en fonction du nombre de cycles vu par les échantillons, chaque point correspondant à un échantillon différent. On observe une corrélation entre le nombre de cycles et le diamètre délaminé, malgré une forte dispersion. Par ailleurs, sur le même système barrière thermique, des coupes métallurgiques ont permis de mesurer la fraction linéique délaminée en fonction du nombre de cycles.

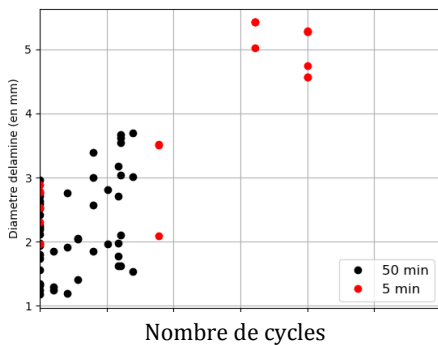


Figure 7 : Évolution du diamètre délaminé en fonction du nombre de cycles

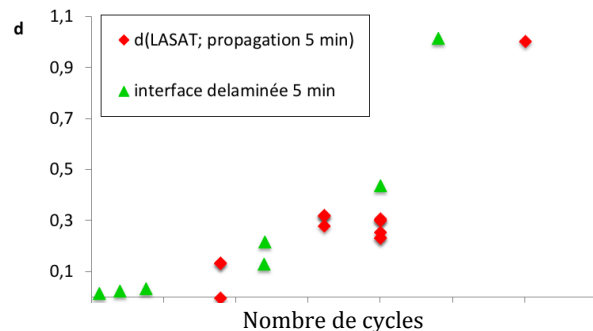


Figure 8 : Comparaison de nos résultats à ceux de [7]

Lorsqu'on compare l'évolution des diamètres délaminés obtenus par choc laser et mesurés par thermographie infra-rouge à l'évolution de la fraction linéique de délaminage interfacial [7], on constate une évolution similaire (cf. figure 8). Cette corrélation tend à montrer que les mécanismes d'endommagement avec ou sans choc laser initial sont de même nature. Des observations complémentaires par coupe métallographiques des échantillons permettront de valider cette hypothèse. Enfin, l'évolution monotone du délaminage en fonction du nombre de cycles montre qu'il s'agit d'un mécanisme d'endommagement de type fatigue associé à une propagation de fissure d'interface. Enfin, si l'on compare l'influence d'un cycle long à un cycle court, on observe que pour un même temps passé à température maximale du cycle, le cycle court est plus endommageant que le cycle long.

4. Conclusions

Une méthode originale de caractérisation de l'évolution de l'endommagement a été mise en œuvre pour des échantillons revêtus d'un système barrière thermique EB-PVD standard. Il consiste en l'introduction par choc laser d'un défaut d'interface. L'introduction d'un tel défaut permet de suivre son évolution au cours du cyclage thermique. Ces observations montrent que le cyclage thermique conduit à un endommagement piloté par le nombre de cycles et associé à la propagation d'une fissure d'interface en conditions cycliques. Cette méthode est un premier jalon pour établir des lois d'endommagements d'interface pour différentes complexités de chargement thermo-mécaniques.

Références

- [1] M. Chieux : Vieillessement des systèmes barrière thermique : transformation de phases, oxydation et effet du soufre sur l'adhérence. Thèse de doctorat, Mines ParisTech, France, 2010.
- [2] C. Courcier : Modélisation de la durée de vie à l'écaillage des revêtements barrières thermiques pour aubes de turbine aéronautique. Thèse de doctorat, Mines ParisTech, France, 2009.
- [3] C. Guerre : Étude des mécanismes d'endommagement d'un système barrière thermique déposé sur un superalliage base nickel. Thèse de doctorat, Mines ParisTech, France, 2002.
- [4] V. Guipont : Interfacial toughness evolution under thermal cycling by laser shock and mechanical testing of an EBPVD coating system. 2018.
- [5] P. Sallot, V. Maurel et L. Remy : Analysis of the interdiffusion zone reduction used as a damage criterion for nialpt coatings, 2013.
- [6] H. Sapardanis : Fissuration à l'interface d'un revêtement plasma céramique et d'un substrat métallique sous sollicitations dynamique et quasi-statique multiaxiales. Thèse de doctorat, Mines ParisTech, France, 2016.
- [7] R. Soullignac : Prédiction de la durée de vie à l'écaillage des barrières thermiques, Thèse de doctorat, Mines ParisTech, France, 2014.
- [8] P.Y. They : Adhérence de barrières thermiques pour aube de turbine avec couche de liaison β -(Ni,Pt)Al ou β -NiAl(Zr). Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, France, 2007.
- [9] V.K. Tolpygo et D.R. Clarke : On the rumpling mechanism in nickel-aluminide coatings. Part I : an experimental assesment. Acta Mater., 2004.