

Revêtements colonnaires par projection plasma de suspensions

B. BERNARD - A. QUET - E. HERVE / CEA – DAM Le Ripault
L. BIANCHI / Safran Tech, Magny-les-Hameaux

L'augmentation des températures de fonctionnement des turboréacteurs est un axe de développement privilégié dans l'industrie aéronautique. Une solution est l'optimisation des couches isolantes appelées barrières thermiques. Le procédé de projection plasma de suspensions permet d'envisager une amélioration significative des performances pour les prochaines générations de barrières thermiques. Il a en effet montré des capacités à générer des microstructures colonnaires associant faible conductivité thermique et durée de vie élevée. Le procédé a par ailleurs été évalué pour la réalisation des revêtements sur des pièces fonctionnelles.

Les barrières thermiques utilisées au niveau des parties exposées à des températures élevées au sein des turbines à gaz aéronautiques sont des systèmes multicouches multifonctionnels. Elles permettent, tout en protégeant les éléments métalliques, un gain de température de l'ordre de 100 à 150 °C et ainsi une amélioration du rendement du turboréacteur. Plusieurs générations de barrières thermiques se sont succédé, au rythme du développement des procédés de dépôt. Sur le plan industriel, deux technologies sont utilisées pour la mise en œuvre de la couche céramique isolante en zircone yttrée (YSZ). La projection plasma sous air à pression atmosphérique (APS, Atmospheric Plasma Spraying) conduit à des microstructures lamellaires à faible conductivité thermique mais à durée de vie limitée. Pour les pièces fortement sollicitées thermomécaniquement, le procédé de dépôt physique en phase vapeur avec une évaporation sous faisceau d'électrons (EBPVD, Electron Beam Physical Vapor Deposition) est privilégié. En effet, les microstructures colonnaires résultant de ce procédé assurent, notamment *via* l'accommodation des contraintes thermomécaniques, des durées de vie élevées. Néanmoins, une limitation propre à cette structure colonnaire réside dans des valeurs de conductivité thermique relativement élevées. Cet article s'intéresse aux possibilités offertes par le procédé de projection plasma de suspensions pour améliorer les propriétés de la couche en YSZ.

Modulation de la microstructure

Évolution du procédé de projection plasma conventionnel, le procédé de projection plasma de suspensions (SPS, Suspension Plasma Spraying) consiste à injecter, dans un jet de plasma, une suspension de particules

dispersées dans un solvant, voire des précurseurs du matériau à déposer en solution. Ses principaux atouts résident dans sa capacité à générer une large gamme de compositions et de microstructures de revêtements (colonnaires, homogènes, micro-fissurées verticalement, incluant des taux de porosité contrôlés), en modulant les caractéristiques de la suspension et les conditions plasma. La microstructure colonnaire, associée à des durées de vie élevées, présente un intérêt particulier. La formation des colonnes trouve son origine dans la déviation des petites particules au voisinage du substrat [1]. Une étude microstructurale a conduit à l'identification et à la maîtrise des paramètres influant sur la morphologie des revêtements (taille de colonnes, distribution de taille, compacité) [2]. Deux nuances optimisées en zircone yttrée, nommées colonnaire et colonnaire compacte (figure 1), ont été

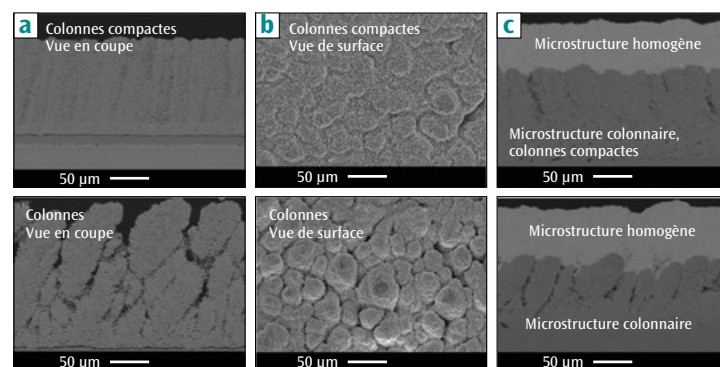


Figure 1. Micrographies de revêtements en zircone yttrée (YSZ), de microstructure colonnaire compacte (en haut) et colonnaire (en bas), réalisés par projection plasma de suspensions : (a) vues en coupe polie et (b) morphologie de surface. (c) Illustration des possibilités de fonctionnalisation de ces dépôts par un revêtement de microstructure homogène.

sélectionnées et mises en œuvre sur des supports en superalliage revêtus d'une sous-couche d'accroche. Des architectures bicouches comprenant un dépôt colonnaire et un dépôt homogène en surface ont également été développées, démontrant la capacité du procédé à apporter une fonctionnalité supplémentaire à l'empilement, telle une résistance aux agressions environnementales de type chimique (infiltrations CMAS $[\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2]$) ou mécanique (érosion) (figure 1).

Propriétés thermiques et durées de vie

La conductivité thermique des revêtements a été estimée à partir de mesures de diffusivité réalisées par méthode flash. Elle peut notamment être modulée par l'espacement entre les colonnes. Les deux dépôts SPS optimisés, colonnaire et colonnaire compact, présentent des conductivités thermiques inférieures à $0,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, c'est-à-dire des valeurs avantageuses par rapport à celles des revêtements EBPVD évaluées à $1,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (figure 2). Les performances des dépôts colonnaires SPS, en matière d'isolation thermique, apparaissent par ailleurs compétitives par rapport aux dépôts YSZ obtenus par APS, dont la conductivité thermique a été mesurée à $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Ces résultats peuvent s'expliquer par la réduction en taille de la porosité et sa dispersion homogène.

La durée de vie des dépôts colonnaires SPS, évaluée par des essais de cyclage thermique entre 80 et 1100°C , démontre également l'opportunité qu'offre le procédé pour l'amélioration des barrières thermiques. Elle apparaît au moins équivalente à celle d'un dépôt YSZ réalisé par EBPVD, considérant que la sous-couche d'accroche diffère (β NiAlPt pour l'EBPVD et γ/γ' pour le procédé SPS). La microstructure colonnaire présente des durées de vie supérieures à la micro-

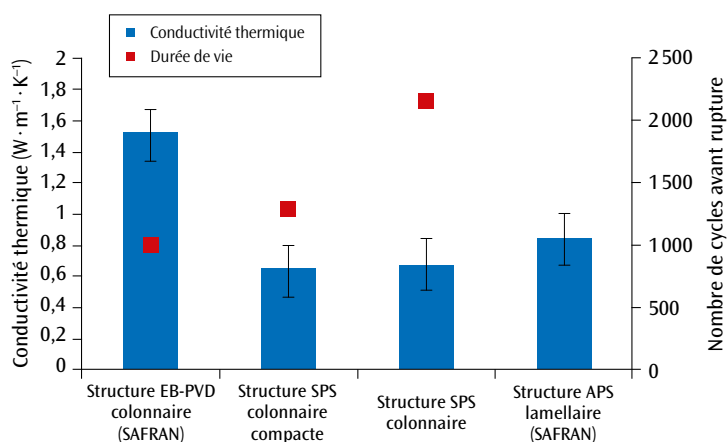


Figure 2. Comparaison des valeurs de conductivité thermique et des durées de vie (résistance au cyclage thermique) de revêtements en YSZ réalisés via les procédés EBPVD (sous-couche β NiAlPt), projection plasma de suspensions (SPS, sous-couche γ/γ') et projection plasma voie sèche (APS). Le procédé de projection plasma de suspensions SPS permet d'obtenir des conductivités thermiques très satisfaisantes, inférieures à $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et des durées de vie comparables, voire supérieures, à celles du procédé EBPVD, dépendamment de la sous-couche d'accroche.

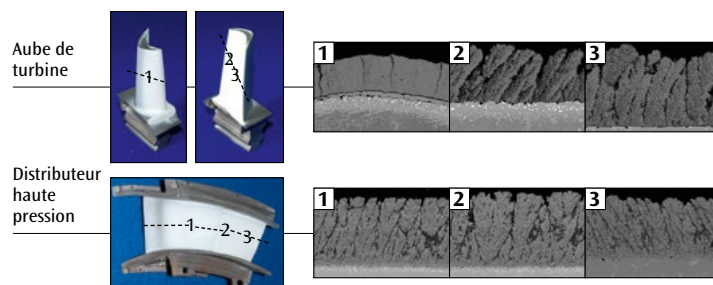


Figure 3. Aube et distributeur de turbine haute pression avec un revêtement réalisé par projection plasma de suspensions et micrographies du revêtement illustrant la variation de la microstructure (orientation des colonnes) en fonction des zones d'observation numérotées de 1 à 3.

structure colonnaire compacte. Le résultat le plus élevé obtenu, supérieur à 2000 cycles, est particulièrement prometteur (figure 2).

Essais de mise en œuvre sur des pièces fonctionnelles

La faisabilité de mise en œuvre des revêtements colonnaires sur des pièces opérationnelles, tels une aube de turbine et un distributeur haute pression, a été considérée (figure 3). L'accroche du dépôt SPS est satisfaisante tout comme la conservation des trous d'évent. La microstructure présente une variabilité inhérente à la réalisation de dépôts sur pièce. L'impact de ces variabilités sur les propriétés reste à évaluer. Le cas échéant, une optimisation de la cinématique de dépôt pourrait être menée.

Conclusion

Les performances, en matière de conductivité thermique et de durée de vie, de revêtements colonnaires obtenus par projection plasma de suspensions sont particulièrement remarquables pour une application au sein des systèmes de barrières thermiques. La diversité des matériaux projetables et la possibilité de générer différentes microstructures pour la réalisation d'empilements multifonctionnels sont également des atouts pour satisfaire les exigences multiples liées à l'environnement de fonctionnement.

Références

- [1] K. VAN EVERY *et al.*, "Column formation in suspension plasma-sprayed coatings and resultant thermal properties", *J. Therm. Spray Tech.*, **20**, p. 817-828 (2011).
- [2] B. BERNARD *et al.*, "Columnar suspension plasma sprayed coating microstructural control for thermal barrier coating application", *J. European Ceramic Society*, **36**, p. 1081-1089 (2016).