

ISOTHERMAL CYCLIC FATIGUE AT HIGH TEMPERATURE OF DIVERSE YTTRIA STABILIZED ZIRCONIA SUSPENSION PLASMA SPRAYED COATINGS

ALICE DOLMAIRE¹, AURELIEN JOULIA²,
LUC BIANCHI³, PIERRE-MARIE GEFFROY¹, MICHEL VARDELLE^{1*}

¹ Université de Limoges, IRCER (UMR CNRS 7315), 12 rue Atlantis, 87068 Limoges

² Safran Tech Paris-Saclay, CS80112 rue des Jeunes Bois 78772 Magny-les-Hameaux

³ Safran Aircraft Engines, 1 rue Maryse Bastié 86100 Châtellerauld

Summary: The aim of this study is to improve suspension plasma spraying of zirconia doped with yttria in order to offer an alternative technology to the very costly electron-beam physical vapour deposition technique used for thermal barrier coatings in aeronautical industries. Diverse yttria stabilized zirconia coating architectures were obtained by slightly varying plasma jet thermophysical properties. Coatings were then submitted to isothermal cyclic fatigue tests. All of them displayed a lifetime corresponding to yttria stabilized zirconia coatings produced by electron-beam physical vapour deposition.

Key words: yttria stabilized zirconia, suspension plasma spraying, electron-beam physical vapour deposition, columnar coating, thermal cyclic fatigue, lifetime in thermal fatigue, thermomechanical properties

1. INTRODUCTION

La projection plasma de suspension (SPS) est un des procédés de projection thermique connaissant un fort gain d'intérêt à l'échelle industrielle dans le domaine aéronautique depuis une dizaine d'années pour l'application de barrière thermique. En effet, sa facilité d'implantation sur un site industriel car fonctionnant sous atmosphère ambiante, la grande variété possible d'architectures de revêtements réalisables ainsi que le plus faible coût d'investissement, la rendent très attractive en comparaison à la technologie historique de dépôt sous vide en phase vapeur (EB-PVD) [1-2]. Néanmoins, de nombreux paramètres liés au procédé SPS entrent en ligne de compte dans l'élaboration de dépôts colonnaires maîtrisés et reproductibles, sans qu'une véritable hiérarchisation ait pu être mise en évidence par la communauté scientifique à ce jour [3-9]. De plus, il faut que les dépôts élaborés par SPS résistent mécaniquement aux fortes contraintes thermiques et au phénomène d'érosion aussi longtemps que les dépôts produits par EB-PVD afin d'en être une technologie de remplacement viable industriellement.

De fait, le premier objectif de cette étude a été de concevoir par SPS différents dépôts colonnaires de zircone yttrée, matériau usuel des barrières thermiques dans l'aéronautique, en faisant varier seulement les propriétés thermophysiques du plasma, à savoir l'enthalpie et la vitesse du jet plasma. Le second objectif a été de comparer la durée de vie en oxydation cyclique à haute température des différents dépôts SPS réalisés avec celle de revêtements EB-PVD élaborés industriellement.

* Corresponding author, michel.vardelle@unilim.fr

2. METHODE EXPERIMENTALE

2.1. Préparation de la suspension et des substrats

2.1.1. préparation de la suspension

La suspension chargée à 20% en masse a été préparée dans l'éthanol à l'aide d'une poudre de zircone ZrO_2 dopée à 8mol%. en oxyde d'yttrium Y_2O_3 (IMERYS FUSED MINERALS, Laufenburg, Allemagne) et d'un dispersant à base d'ester de phosphate nommé CP213 (3D-Ceram, Limoges, France). La poudre utilisée comporte une distribution granulométrique monomodale submicronique centrée autour de $0,77\mu m$ en volume après dispersion.

2.1.2. préparation des substrats

Des pions industriels en superalliage de nickel (type AM1) recouverts d'une couche nickel-aluminium-platine β -(Ni,Pt)Al ont été utilisés. Ces pions sont de diamètre 25mm et d'épaisseur 1mm. Ils ont été sablés à l'aide d'un corindon blanc de taille F80 ($150\mu m$) afin d'obtenir une rugosité de surface $Ra=1-2\mu m$, puis ils ont été pré-oxydés à haute température afin de former une fine couche d'alumine et d'assurer une bonne compatibilité thermomécanique avec le revêtement céramique futur.

2.2. Projection plasma de suspension, calcul de l'enthalpie et de la vitesse moyenne du jet plasma

2.2.1. Paramètres de projection plasma de suspension

La torche à plasma TriplexPro 200 (Oerlikon Metco, Kelsterbach, Allemagne) a été employée pour la projection. L'injection de la suspension se fait dans ce système orthogonalement à l'axe du jet plasma, à une distance de 1mm de la sortie de la tuyère de la torche et à une pression d'injection de 6,5 bars. Les substrats ont été placés sur un cylindre en inox animé d'un mouvement de translation et de rotation à une distance de 60mm de la sortie de la tuyère. Cet ensemble est refroidi à l'air comprimé afin de garder en surface des échantillons une température constante ne dépassant pas les $500^\circ C$ au cours des tirs. Les seuls paramètres procédés qui évoluent dans cette étude sont : les débits de gaz d'argon et d'hélium formant le plasma variant respectivement de 40 à 120 L/min et 0 à 10 L/min ; puis le courant électrique traversant la torche, variant de 400 à 480A.

2.2.2. Calculs de l'enthalpie du jet plasma et de la vitesse moyenne du jet plasma en sortie de tuyère

Le bilan thermique expérimental de la torche permet de calculer l'enthalpie du jet plasma H_g à partir du débit massique des gaz w , de la puissance électrique totale P_e et du rendement e de la torche pour chaque condition de tir (1). Les propriétés thermodynamiques du mélange de gaz argon-hélium permettent d'estimer la température du jet plasma à partir de l'enthalpie mesurée précédemment et ainsi de connaître la densité du mélange $\rho(TH_g)$ à cette même température. Il est alors possible de déduire une vitesse moyenne du jet plasma v_g en sortie de tuyère, de section S_n (2). Ces valeurs d'enthalpie et de vitesse moyenne du jet plasma permettent in fine d'établir une cartographie de l'architecture de dépôt en fonction de l'enthalpie et de la vitesse du jet plasma.

$$H_g = \frac{P_e e}{w} \quad (1)$$

$$v_g = \frac{w}{S_n \rho(TH_g)} \quad (2)$$

2.3. Vieillessement par oxydation cyclique à haute température

Le vieillissement par oxydation cyclique à haute température consiste à introduire les pions revêtus dans un four isotherme et de répéter en continu le cycle thermique suivant : une montée en température en moins de 15 min à $1100^\circ C$, suivi d'un palier en température d'une durée de 45min puis d'une trempe pendant 15min sous air turbiné afin d'atteindre une température inférieure à $80^\circ C$. Les dépôts sont considérés comme ayant atteint leur durée de vie maximale lorsque 20% de leur surface est écaillée. Lors de cet essai en vieillissement, 12 pions revêtus par SPS et 2 pions revêtus par EB-PVD, servant de référence, ont été introduits ensemble dans le même four.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Cartographie architecture du dépôt – enthalpie du jet plasma – vitesse moyenne du jet plasma

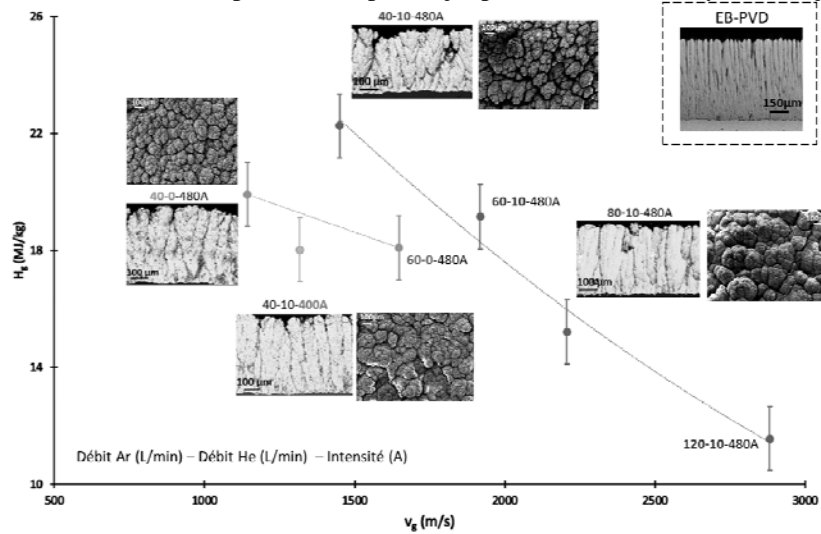


Fig.1. Cartographie des architectures de dépôt en fonction de l'enthalpie et la vitesse moyenne du jet plasma.

Les résultats (Fig.1.) montrent que l'enthalpie du plasma diminue de manière inversement proportionnelle à la vitesse du jet plasma, c'est-à-dire avec l'augmentation du débit d'argon dans le mélange gazeux. De même, les architectures de dépôts obtenues (Fig.1.) montrent que plus l'enthalpie du plasma est élevée, c'est-à-dire plus la température du jet est élevée, plus les colonnes de zircone yttrée prennent une forme conique. De même, plus la vitesse du jet plasma est élevée, plus les colonnes de zircone yttrée se resserrent et se densifient.

Ainsi, un plus large volume de particules de zircone yttrée injectées dans le jet plasma atteint la fusion dans un plasma à forte enthalpie ($> 18 \text{ MJ/kg}$), tel que le plasma de condition 40-10-480A (Fig.1.). Dans ce cas précis, en impactant la surface du substrat en mouvement, les particules forment en continu des dépôts de colonnes qui s'enchevêtrent au fur et à mesure des passages de la torche en prenant une forme conique. Inversement, ce même volume de particules évoluant dans un plasma à faible enthalpie ($< 18 \text{ MJ/kg}$), tel que le plasma de condition 40-10-400A (Fig.1.), n'est traité thermiquement qu'au centre du jet plasma. Une quantité non-négligeable de particules non-fondues n'adhèrent alors pas à la surface du substrat. Ceci a pour effet d'augmenter la porosité au sein du revêtement. Ce traitement thermique spécifique engendre de même des colonnes plus droites et ininterrompues depuis la base du revêtement car le centre du jet plasma est orthogonal à la surface des substrats. L'apport de la vitesse du jet dans ces deux domaines d'enthalpie assure dans le cas d'une vitesse inférieure à 2000 m/s un filtrage accru des particules participant à la construction des colonnes. Au-dessus de cette valeur, la vitesse du jet plasma exacerbe l'étalement des particules ce qui entraîne la densification constatée des colonnes formées, tel que visible pour la condition 80-10-480A (Fig.1.).

De fait, les propriétés thermophysiques du jet plasma modifient l'architecture finale des dépôts de zircone yttrée projetée sous forme de suspension.

3.2. Vieillessement des revêtements par oxydation cyclique à haute température

Les résultats de vieillissement par oxydation cyclique à haute température (Fig.2.) montrent que trois des quatre types de revêtement élaborés par SPS résistent aussi longtemps que les revêtements déposés par EB-PVD, en prenant en compte les dispersions importantes inhérentes à cet essai.

Néanmoins, les revêtements issus de la condition plasma 40-10-480A présentent la durée de vie la plus faible en oxydation cyclique. L'hypothèse avancée à ce jour est que l'architecture très ouverte de ces dépôts faciliterait particulièrement la pénétration de l'oxygène vers la fine couche d'alumine formée sur la sous-couche métallique, du fait d'espaces intercolonnaires très larges ($\sim 50 \mu\text{m}$) et nombreux (Fig.1.). Or un des principaux modes de rupture des revêtements de zircone yttrée dans le système de barrière thermique est du à l'activation à 1100°C par l'oxygène de la croissance de cette couche d'alumine [10]. A terme, elle engendre des différences trop importantes en dilatation thermique entre les couches de la structure $\beta\text{-(Ni,Pt)Al/Al}_2\text{O}_3\text{/ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ ce qui créent

des contraintes élevées entre ces couches, amorçant alors la délamination du revêtement proche de l'interface avec l'alumine lors du refroidissement [10].

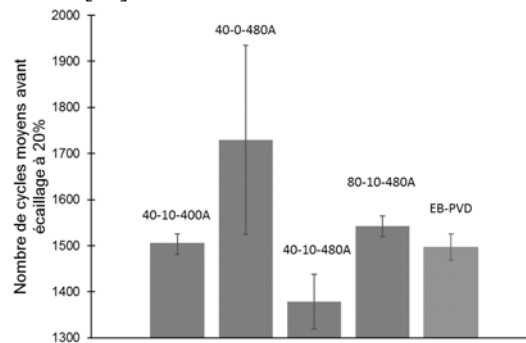


Fig.2. Résultats en durée de vie moyenne des dépôts SPS et EB-PVD

4. CONCLUSIONS

Il est ainsi possible d'adapter l'architecture colonnaire de dépôt de zircone yttrée par projection plasma de suspension submicronique en modifiant simplement l'intensité de la torche ou le débit des gaz plasmagènes. De plus, la majorité des dépôts colonnaires ainsi obtenus présente une durée de vie en oxydation cyclique à haute température équivalente à celle des dépôts colonnaires de zircone yttrée élaborés par EB-PVD. Des essais de validation sont en cours afin de confirmer cette tendance et de mettre en lumière les modes d'endommagement.

La projection plasma de suspension est donc un procédé fort prometteur pour l'optimisation des revêtements en zircone yttrée pour l'application de barrière thermique dans l'industrie aéronautique.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Feuerstein, J. Knapp, T. Taylor, A. Ashary, A. Bolcavage, N. Hitchman, Technical and Economical Aspects of Current Thermal Barrier Coating Systems for Gas Turbine Engines by Thermal Spray and EBPVD: A Review, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 17, no. 2, 2008, p. 199-213.
- [2] P. Fauchais, J.V.R. Heberlein, M.I. Boulos, *Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part*, Springer, 2016.
- [3] P. Fauchais, M. Vardelle, S. Goutier, Latest Researches Advances of Plasma Spraying: From Splat to Coating Formation, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 25, no. 8, 2016, p. 1534-1553.
- [4] B. Bernard, L.Bianchi, A.Malié, A.Joulia, B.Rémy, Columnar suspension plasma sprayed coating microstructural control for thermal barrier coating application, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 36, 2016, p.1081-1089.
- [5] X. Chen, S. Kuroda, T. Ohnuki, H. Araki, M. Watanabe, Y. Sakka, Effects of Processing Parameters on the Deposition of Ytria Partially Stabilized Zirconia Coating During Suspension Plasma Spray, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 99, no. 11, 2016, p.3546-3555.
- [6] N. Curry, Z. Tang, N. Markocsan, P. Nylén, Influence of bond coat surface roughness on the structure of axial suspension plasma spray thermal barrier coatings - Thermal and lifetime performance, *Surface & Coatings Technology*, vol. 268, 2015, p.15-23.
- [7] N. Curry, K. VanEvery, T. Snyder, J. Susnjar, S. Bjorklund, Performance Testing of Suspension Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings Produced with Varied Suspension Parameters, *Coatings*, vol. 5, 2015, p.338-356.
- [8] R. C. Seshadri, G. Dwivedi, V. Viswanathan, S. Sampath, Characterizing Suspension Plasma Spray Coating Formation Dynamics through Curvature Measurements, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 25, no. 8, 2016, p. 1666-1683.
- [9] P. Sokołowski, S. Kozerski, L. Pawłowski, A. Ambroziak, The key process parameters influencing formation of columnar microstructure in suspension plasma sprayed zirconia coatings, *Surface & Coatings Technology*, vol. 260, 2014, p.97-106
- [10] A.G. Evans, D.R. Mumm, J.W. Hutchinson, G.H. Meier, F.S. Pettit, Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings, *Progress in Materials Science*, vol. 46, 2001, p.505-553.