



La réalisation d'une couche mince à partir de poudres de silicium

Aissa Abderahmane^a, M. Abdelouahab^a, A. Noureddine^b, B. Pateyron^c, M. El Ganaoui^c

^a laboratoire de modelisation des systemes industriels -usto-mb, bp 1505 el m'naouer 31000 Oran, algeria

^b laboratoire de mecanique appliquee- usto-mb, bp 1505 el m'naouer 31000 Oran, Algeria

^c laboratoire science des procédés céramiques et de traitements de surface université de limoges-(france)

^d institut universitaire de technologie de longwy 186 rue de lorraine cosnes et romain 54400 nancy –(France)

email: aissa86@gmail.com

abdel55@yahoo.com

Résumé--

Divers travaux de recherche sont actuellement en cours et concernent l'élaboration de cellules photovoltaïques en couches minces ou encore l'élaboration de silicium photovoltaïque par purification d'un silicium de qualité métallurgique. La réalisation d'une couche mince de silicium cristallin de qualité solaire, à partir de poudres de silicium de qualité métallurgique, purifiées et projetées sur un substrat en céramique avec un plasma thermique inductif. Les particules de silicium injectées dans un plasma d'argon faiblement hydrogéné, sont dans un premier temps fondues puis purifiées par évaporation partielle pour être enfin déposées à l'état liquide sur le substrat. Les couches obtenues sont également hydrogénées par interaction entre le silicium liquide et les hydrogènes atomiques issus de la dissociation de l'hydrogène gazeux dans le plasma. Notre objectif est étudié le comportement thermique et mécanique des particules de silicium dans le gaz plasmagène avant l'impact sur le substrat.

Mots clés-- nombre de Nusselt, plasma thermique, interaction

I. INTRODUCTION

La projection par plasma d'arc conventionnelle consiste à utiliser des matériaux pulvérulents (particules solides de diamètre compris usuellement entre 10 et 100 μm) à fusion congruente [1-5], possédant un écart de température d'au

moins 300 K entre sa fusion et, soit son évaporation soit sa décomposition. Ces grains de poudre sont injectés dans un jet de plasma produit par un arc électrique continu entre deux électrodes avec comme gaz plasmagène un gaz pur ou un mélange binaire ou un mélange ternaire de gaz monoatomiques (Ar, He), et/ou diatomiques (H₂, N₂). Les particules sont alors fondues, accélérées et s'écrasent sur un substrat préalablement préparé afin de réaliser un dépôt dont l'épaisseur est comprise entre 100 μm et quelques mm avec une architecture constituée d'empilement de lamelles écrasées. Le jet de plasma est produit par l'écoulement d'un mélange de gaz dans un arc électrique établi en continu entre les deux électrodes. A la sortie de la colonne d'arc électrique, le plasma formé est en extinction. Il en résulte un jet de gaz à haute température au maximum de l'ordre de 12 000 à 14 000 K et à grande vitesse de 600 à 2200 m/s à la pression atmosphérique (vitesses qui restent subsoniques à ces températures).

Ces caractéristiques dépendent bien sûr des paramètres géométriques de construction de la torche (diamètre interne de la tuyère et forme de celle-ci, mode d'injection des gaz plasmagènes autour de la cathode, ...) ainsi que des paramètres opératoires (débit masse et composition du gaz



plasmagène, intensité du courant d'arc, ...). Le jet de plasma est caractérisé également par des gradients radiaux de vitesse et de température relativement grands pour le jet en expansion

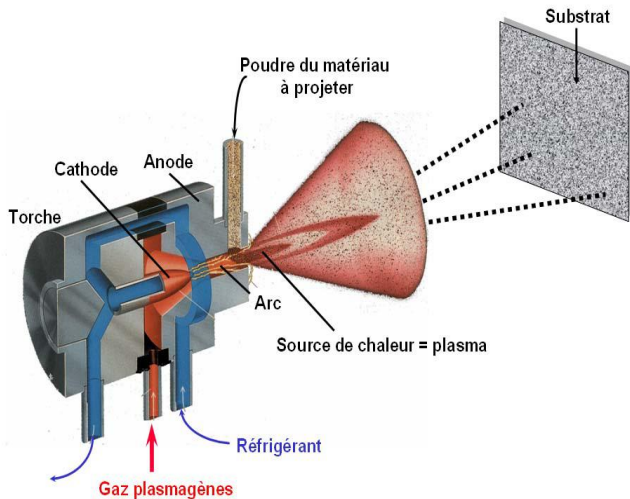


Figure 1: Principe de la projection plasma d'arc et ses principaux sous-systèmes Fonctionnels

(Pour la vitesse, le gradient est de l'ordre de 2500 s^{-1} et pour la température de l'ordre de 2500 K/mm). Dans le procédé de projection plasma, il est possible de distinguer quatre systèmes fonctionnels :

- 1 la génération du jet plasma par la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique.
- 2 l'écoulement du jet plasma et l'interaction avec le gaz environnant et avec la poudre.
- 3* l'élaboration du dépôt par empilement des lamelles sur le substrat. Comme illustré dans la figure 1. On va étudier par une simulation numérique directe le flux de chaleur reçu par une particule immergée dans un milieu plasmagène pour le flux estimé aux valeurs obtenues numériquement et aussi par l'usage de corrélation Ranz & Marshall.

2-Model numérique transfert de quantité de mouvement. Les forces qui s'exercent sur les particules dans le jet plasma et qui régissent leurs trajectoires sont principalement :

La force de traînée: c'est la force la plus importante, elle peut être modifiée par l'évaporation de la Particule et des effets de non continuité de la couche limite

$$F_D = -\frac{1}{2} C_D \cdot \pi \cdot \frac{d_p^2}{4} \rho_\infty |\vec{V}_\infty - \vec{V}_p| \cdot (\vec{V}_\infty - \vec{V}_p) \quad (1)$$

La force de gravité:

$$F_g = -\frac{\pi d_p^3}{6} \cdot (\rho_p - \rho_\infty) \cdot g \quad (2)$$

3-Transfert thermique au niveau de la particule--

Plusieurs travaux montrent qu'en absence de réactions chimiques à la surface, le chauffage par conduction convection dans la couche limite thermique est le mécanisme principal du chauffage de la particule dans le jet plasma. Alors que la particule, sous condition plasma, se refroidit par rayonnement vers le milieu ambiant. Souvent le transfert radiatif du plasma vers la particule est négligé et le plasma est donc considéré comme optiquement mince [1].

En fonction du gaz plasmagène et de sa conductivité thermique, les particules sont soumises à des flux de chaleur très importants qui peuvent atteindre 10^8 W.m^{-2} , ce qui entraîne leur évaporation et modifie ainsi le transfert thermique vers elles, en effet :

-Le flux thermique reçu par une particule qui s'évapore diminue, puisqu'une partie du flux est convertie en enthalpie d'évaporation et que l'autre partie sert à chauffer les vapeurs et à les élever de la température de la surface de la particule à la température du gaz.

-L'évaporation des particules modifie le mélange gazeux et donc ses propriétés thermodynamiques et de transport dans la couche limite et dans le jet.



Pour modéliser la conduction et la convection de chaleur par un fluide, l'équation de la chaleur inclut également une limite convective. Représente cette formulation mode dans de convection et de conduction application comme :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \nabla \cdot T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3)$$

Là où u est le champ de vitesse. Ce champ fourni comme expression mathématique calculée par un accouplement au champ de vitesse d'un mode d'application tel qu'incompressible Navier-stokes.

Pour le transport par la conduction et la convection, le vecteur de flux thermique a rapproché près

$$q = -k \nabla T + \rho C_p T u \quad (4)$$

Le coefficient de transfert de chaleur h est classiquement calculé à l'aide de la corrélation de Ranz et Marshall [6] obtenue pour des gouttes liquides en mouvement de translation:

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} + 0.4 Pr^{1/3} \quad (5)$$

4-COUPPLAGE AVEC LA DYNAMIQUE DE LA PARTICULE--

La trajectoire d'une particule isolée dans le jet plasma est calculée à partir du bilan des forces exercées sur celle-ci. Les forces autres que les forces citées peuvent être négligées conformément aux résultats des études consacrées à leur importance relative. L'équation du mouvement est donnée par [5] :

$$m_p \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} c_D \pi \frac{d_p}{4} \rho_\infty |v_\infty - v_p| (|v_\infty - v_p|) \quad (6)$$

5-Résultats & discussions

Le modèle du transfert de chaleur plasma-particule et des changements de phase susceptibles de s'effectuer dans une particule sous conditions plasma illustré dans la figure 3. Ceci

peut faire de la particule une succession plus ou moins complexe de phases.

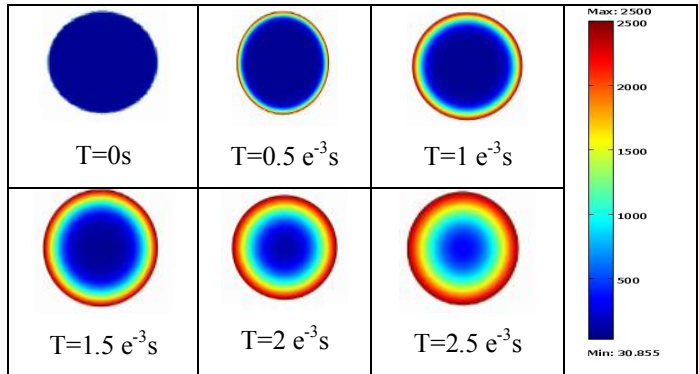


Figure 3: changements de phase (solide-liquide-vapeur) de particule de silice dans le jet plasma Ar-H₂.

La couche limite qui se développe autour de la particule se caractérise par un gradient important de température, la différence de température entre le gaz et la surface de la particule peut atteindre 4000 °K [1], ce qui se traduit par des phénomènes de diffusion dans la couche limite et implique un écart à l'équilibre chimique fonction de l'ordre de grandeur des vitesses des réactions chimiques et de la vitesse de diffusion.

Dans ce papier on a étudié l'échange thermique d'une particule isolée de silice dans un domaine on l'utilisation logiciel COMSOL.MULIPHYSIQUE

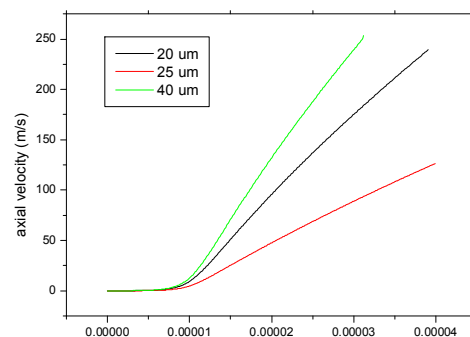


Figure2 : évolution temporelle de la vitesse axiale de la particule dans le jet de plasma

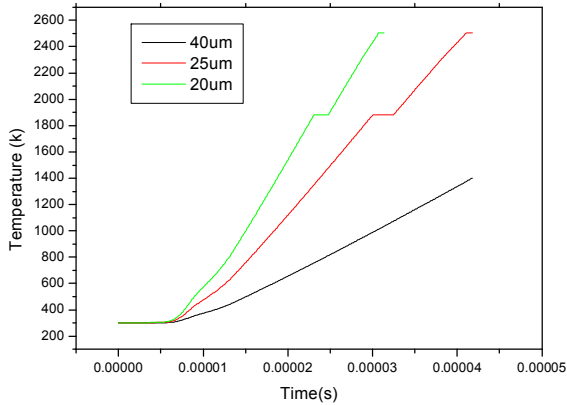


Figure3 : histoire thermique des particules solides injectées dans le jet de plasma.

La particule, considérée comme immobile, est plongée dans un écoulement plasma à 6000 °K et de vitesse V à l'infini. Elle est chauffée progressivement à travers une couche limite par un flux de chaleur d'origine conductive et convective en raison de l'écoulement du fluide.

Figures 2.3 montre que La variation de la vitesse de jet de plasma affecté un traitement thermique et dynamique des particules. Trois cas sont considérés le diamètre 25.29µm et 40µm successivement.les petites particules atteindre la température de point de fusion (1883k) plus rapidement comme a été précédemment rendu compte de la littérature [8,9].

6-CONCLUSION

Au terme de cette étude, il apparait que l'interaction d'une poudre avec un jet de plasma fait intervenir plusieurs mécanismes complexes. Nous retiendrons que lors de l'injection d'une poudre dans un jet de plasma, celle-ci peut être le siège de divers modes d'échanges de chaleur et de masse comme la conduction, la convection, le rayonnement, le changement de phase (fusion et solidification, évaporation) et l'oxydation. Bien sur la prépondérance d'un mode par rapport

à un autre est tributaire de la taille des particules, de la nature du matériau et du milieu plasma mais aussi de la dynamique et thermique de l'écoulement du jet.

7-Références

- [1] Y. Zhu, H. Liao, C. Coddet, Transient thermal analysis and coating formation simulation of thermal spray process by finite difference method, j of Surface & Coatings Technology 200 (2006) pp 4665– 4673
- [2] P Fauchais, G. Montavon, M. Vardelle, J. Cedelle, Developments in direct current plasma spraying, j of Surface & Coatings Technology 201 (2006) 1908–1921.
- [3] Mingheng Li, Panagiotis D. Christofides, Computational study of particle in-flight behavior in the HVOF thermal spray process, Chemical Engineering Science 61 (2006) 6540 – 6552.
- [4] E. Pfender, Particle behaviour in thermal plasma, Plasma Chem. And Plasma Proc 9-1, (1989), pp 167-194.
- [5] P. Fauchais, M. Vardelle, J. F. Coudert, A. Vardelle, C. Delbos, J. Fazilleau, Thermal plasma deposition from thick to thin coatings and from micro- to nanostructure, Pure Appl. Chem., Vol. 77, No. 2, pp. 475–485, 2005
- [6] P. fauchais, M. vardelle, plasma spraying: present and future, pure & appl. chem., vol. 66, no. 6, pp. 1247-1258, 1994.
- [7] B. Pateyron, G. Delluc, logiciel Jets&Poudres, téléchargeable à partir de <http://jets&poudres.free.fr>
- [8] Fauchais P, Vardelle A and Dussoubs B 2001 J. Thermal Spray Technol. 10 44–66.
- [9] J.R.Rojas, M.Cruchaga. M .El Ganaoui, B Pateyron, Numerical simulation of the melting of particle injected in a lasma jet, Ingenaire. Revista chilena de ingenieria, vol. 17 N 3 2009 pp 300-302