



HAL
open science

Sur la modélisation d'un problème multi-physique: la projection à plasma

Zhi-Qiang Feng

► **To cite this version:**

Zhi-Qiang Feng. Sur la modélisation d'un problème multi-physique: la projection à plasma. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812992

HAL Id: hal-01812992

<https://hal.science/hal-01812992>

Submitted on 12 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Sur la modélisation d'un problème multi-physique : la projection à plasma

Zhi-Qiang Feng

*Laboratoire de Mécanique et d'Énergétique d'Evry
Université d'Evry Val d'Essonne
40 rue du Pelvoux, 91020 Evry
feng@iup.univ-evry.fr*

RÉSUMÉ. On présente un modèle numérique pour simuler l'écrasement d'une particule fondue contre un substrat pendant le processus de projection thermique à plasma. Le modèle proposé utilise la méthode des éléments finis dans la formulation Lagrangienne en grandes déformations. Une technique de remaillage adaptatif automatique permet de bien suivre la surface libre et assure une bonne précision des résultats. Dans ce modèle on tient compte du contact avec frottement entre la particule et le substrat représentant une certaine rugosité. On considère également le problème transitoire thermique couplé avec le problème d'impact et d'étalement de la particule.

ABSTRACT. The numerical model was developed for the modeling of the spreading process of a fully molten particle impinging onto a rough flat substrate during the plasma spray process. The model is based on the finite element method and combines a Lagrangian formulation in calculating large deformation and an automatic adaptive remeshing technique to trace accurately the free surface and to ensure the uniform accuracy. A frictional contact condition at the particle-substrate interface was introduced to describe the effects of the substrate surface roughness. The heat transfer during the impact process was also taken into account.

MOTS-CLÉS : problème multi-physique, impact, projection thermique.

KEYWORDS: multi-physical problem, impact, heat transfer.

1. Introduction

Les techniques de projection thermique à plasma ont été utilisées dans l'industrie avec succès depuis de nombreuses années en vue de former un revêtement résistant à la corrosion, à l'oxydation, à l'usure etc. Le procédé de formation des revêtements constitue un problème multi-physique ; il inclut l'impact de particules fondues sur le substrat, le transfert thermique entre les particules et le substrat, l'écrasement et la solidification des particules (Fig. 1) [MAR 04]. En général, pour la simulation dynamique des fluides avec surface libre, il existe deux types de méthode [MAS 95] : la méthode Eulérienne et la méthode Lagrangienne. Dans la méthode Eulérienne, une maille est fixée dans l'espace et la matière passe par la grille ainsi définie. On utilise la technique VOF (Volume Of Fraction) qui consiste à introduire une fonction F pour chaque cellule du maillage. F vaut 1 pour une cellule remplie de matière, 0 pour une cellule vide et entre 0 et 1 pour une cellule renfermant la surface libre du matériau [HIR 81]. Cette technique ne donne pas une bonne précision puisqu'elle ne permet pas de décrire correctement l'orientation de la surface libre et en conséquence ne permet pas de traiter précisément les conditions aux limites. Cette méthode dépend fortement de la dimension des cellules [LIU 93, PAS 96]. Dans la méthode Lagrangienne, le maillage se déforme avec la matière ; elle permet donc de représenter plus précisément la surface libre, mais cette méthode rencontre des difficultés dans le cas de grandes déformations à cause de la distorsion importante des éléments du maillage.

L'objectif de cet article est de développer une méthode Lagrangienne des éléments finis pour simuler l'impact d'une particule liquide sur un solide en prenant compte du transfert thermique. Pour traiter correctement les grandes déformations dans le processus de l'impact, nous proposons une technique de remaillage.

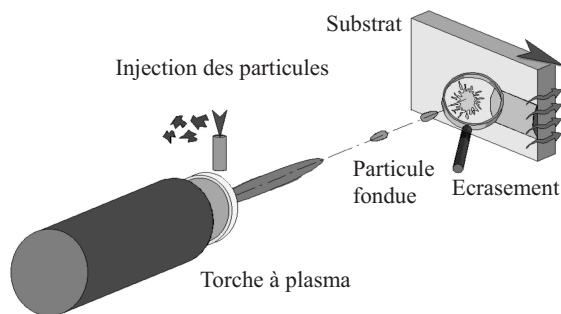


Figure 1. Procédé des projections à plasma

2. Modèles mathématique et numérique

Le mouvement des fluides est décrit par les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie [TRA 91]. Ces lois sont souvent des équations

différentielles qui font intervenir des composantes de la vitesse (u, v), des champs de température (T) et de pression (p). Pour le cas axisymétrique en considération, on a :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right] + f_r \quad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right] + f_y \quad [3]$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{Re Pr} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad [4]$$

où $Re = \frac{\rho v_0 d_0}{\mu}$ est le nombre de Reynolds et $Pr = \frac{\mu C_p}{k}$ le nombre de Prandtl. ρ , μ , k , C_p représentent respectivement la masse volumique, la viscosité dynamique, la conductivité thermique et la chaleur spécifique du matériau. v_0 est la vitesse initiale d'impact. d_0 est le diamètre initial de la particule.

Sur l'interface particule-substrat, la force de frottement f_t dépend de la masse volumique de la particule fondue, la vitesse radiale et la rugosité du substrat. Ainsi, la force de frottement peut être écrite comme suit :

$$f_t = \lambda \rho u^2 \quad [5]$$

où λ est appelé le facteur de rugosité qui dépend de l'état de la surface du substrat. Après une discrétisation par éléments des équations [1-4], on obtient :

$$\mathbf{Q} \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad [6]$$

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}(\mathbf{u}) \mathbf{u} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad [7]$$

$$\overline{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{T}} + \overline{\mathbf{C}} \mathbf{T} + \overline{\mathbf{K}} \mathbf{T} = \overline{\mathbf{F}} \quad [8]$$

où \mathbf{u} et \mathbf{T} sont les vecteurs des variables inconnues (u, v, p, T), \mathbf{M} la matrice de masse, $\mathbf{C}(\mathbf{u})$ la matrice de convection, \mathbf{K} la matrice de viscosité et \mathbf{F} le vecteur forces incluant les forces de frottement. $\overline{\mathbf{M}}$ est la matrice de capacité thermique, $\overline{\mathbf{C}}$ la matrice de convection thermique et $\overline{\mathbf{K}}$ la matrice de conductivité.

Il est évident que ces équations sont non-stationnaires et non-linéaires. Il faut donc choisir une stratégie optimale de couplage des techniques itératives de résolution des systèmes non linéaires avec des techniques d'intégration dans le temps. Ce choix est crucial pour la bonne convergence et l'efficacité de l'algorithme numérique de résolution des problèmes d'impact en dynamique rapide. Dans le code développé nommé FER/Drop, nous avons utilisé les algorithmes de Newton-Raphson pour résoudre le système d'équations non-linéaires et d'Euler implicite pour l'intégration dans le temps des équations dynamiques.

La formulation Lagrangienne est adoptée dans cette étude. Ceci implique que le mouvement du matériel suit celui de la maille après chaque étape de calcul. Afin d'éviter la déformation très sévère des éléments de la maille, il est nécessaire de remailler automatiquement le domaine au cours de calcul. La stratégie de calcul peut donc être résumée comme suit :

- Création automatique du maillage (des noeuds et des connectivités des éléments),
- Lecture des paramètres physiques (viscosité, densité, conductivité, etc.), des sollicitations et des conditions aux limites,
- Construction des matrices et vecteurs élémentaires, puis assemblage de ceux-ci pour former le système global,
- Intégration dans le temps (méthode d'Euler implicite),
- Résolution du système des équations non linéaires (méthode de Newton-Raphson) après prise en compte des conditions aux limites,
- Effectuer une étape Lagrangienne : Selon le champ de vitesse calculé, la position des noeuds est actualisée par : $\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n + \Delta t \mathbf{u}_{n+1}$
- Test de la distorsion des éléments,
- Remaillage si nécessaire,
- Transfert des valeurs d'un maillage à l'autre.

3. Résultats numériques

Dans cette étude, on s'intéresse à la simulation de l'écrasement de la particule d'aluminium fondue sur le substrat supposé rigide. Les caractéristiques du problème sont données au tableau 1.

material	particule : aluminum	substrat : acier	unité
densité	2.38×10^3	7.832×10^3	kg/m^3
viscosité	2.9×10^{-3}	–	$Pa.s$
conductivité thermique	$k_{xx} = 150 ; k_{yy} = 230$	64	$W/m.K$
chaleur spécifique	903	434	$J/kg.K$
température initiale	2800	300	K
resistance thermique du contact	1.0×10^{-4}	–	$m^2.K/W$
dimension	diamètre : 50	épaisseur : 25	μm
vitesse initiale	100	0	m/s
facteur de rugosité λ	$2.5 \times 10^{-3}, 0.25, 4.0$	–	–

Tableau 1. Paramètres physiques.

La figure 2 montre les déformations successives et la morphologie de la particule à l'écrasement. Le remaillage est nécessaire pour assurer une bonne précision des calculs. La figure 3(a) donne le taux d'écrasement de la particule, c'est à dire, le rapport

du diamètre après écrasement sur le diamètre initial de la particule. La figure 3(b) montre l'évolution de la vitesse radiale du point de l'extérieur de la particule en considérant trois états de la surface du substrat. L'influence de la rugosité de la surface du substrat est mise en évidence. La figure 4 présente le champs de température du liquide et du substrat à différents instants. Les deux courbes tracent la variation temporelle de température au centre et à l'extérieur de la particule. Il est à noter que les vitesses de l'écrasement et du transfert thermique sont très importantes.

4. Conclusion

Nous avons développé une méthode des éléments finis Lagrangienne couplée à une technique de remaillage automatique pour simuler l'impact d'une particule fondue sur un substrat. L'effet de la rugosité de la surface de substrat a été pris en considération en terme d'une résistance de frottement à l'interface particule-substrat. Le transfert thermique a été également considéré dans le modèle numérique. La technique numérique développée pourra s'étendre à la modélisation des problèmes de la mise en forme des matériaux.

5. Bibliographie

- [HIR 81] HIRT C. W., NICHOLS B. D., « Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries », *J. Comput. Phys.*, vol. 39, 1981, p. 201-211.
- [LIU 93] LIU H., LAVERNIA E., RANGEL R., « Numerical simulation of impingement of molten Ti, Ni and W droplets on a flat substrate », *J. Thermal spray Technology*, vol. 2, 1993, p. 369-378.
- [MAR 04] MARIAUX G., VARDELLE A., « 3-D time-dependent modelling of the plasma spray process. Part 1 : flow modelling », *Int. J. Thermal Sciences*, vol. -, 2004, p. -.
- [MAS 95] MASHAYER F., ASHGRIZ N., « A hybrid finite-element-volume-of-fluid method for simulating free surface flows and interfaces », *Int. J. Num. Meth. in Fluid*, vol. 20, 1995, p. 1363-1380.
- [PAS 96] PASANDIDEH-FARD M., MOSTAGHIMI J., « Droplet impact and solidification in a thermal spray process : droplet-substrate interaction », *Practical Solution for Engineering Problems*, 1996, p. 637-646.
- [TRA 91] TRAPAGA Z., SZEKELY J., « Mathematical modeling of the isothermal impingement of liquid droplets in spraying processes », *Metal. Trans. B*, vol. 22, 1991, p. 901-914.

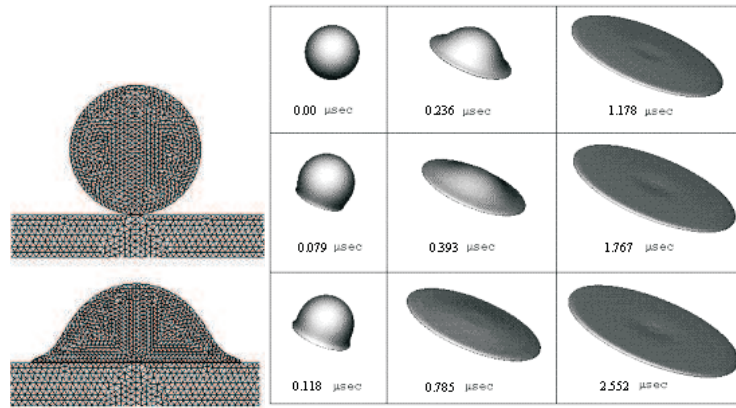


Figure 2. Déformées successives de la particule à l'écrasement

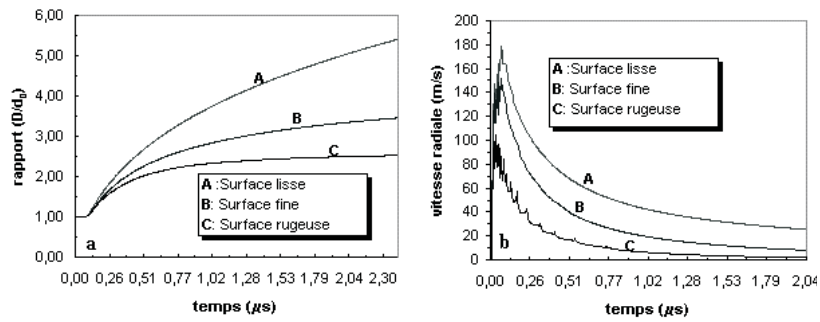


Figure 3. Taux d'écrasement et vitesse radiale

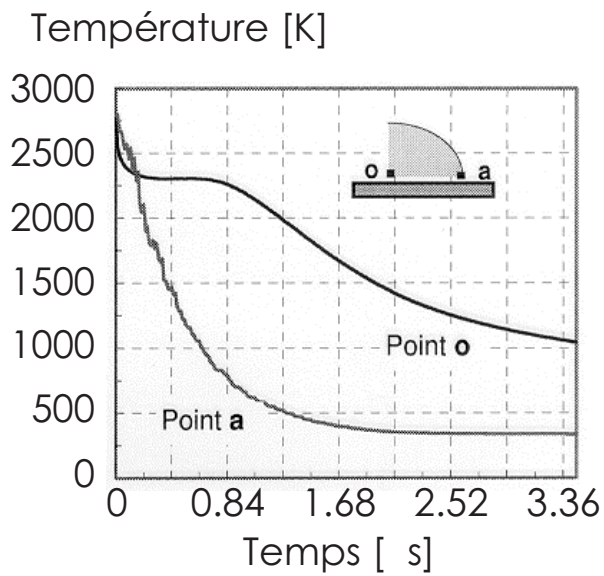
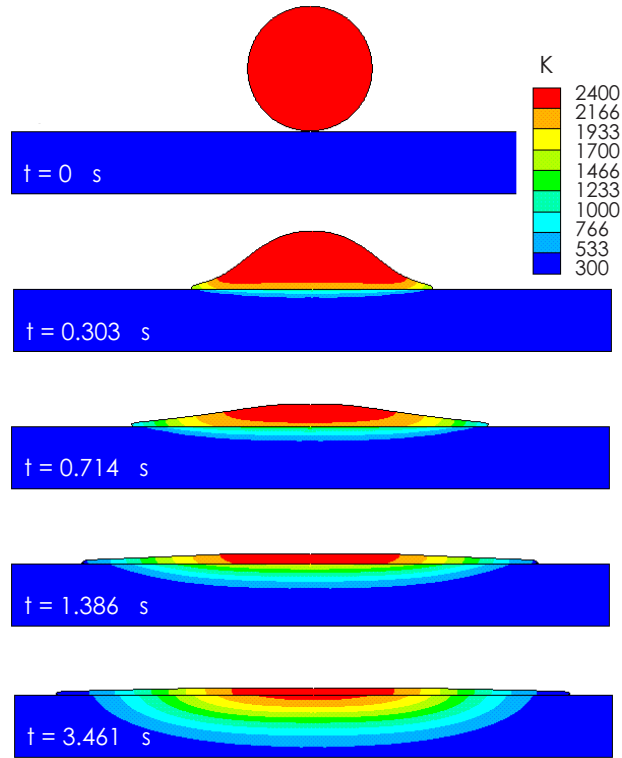


Figure 4. Champs de température à différents instants de l'écrasement