



HAL
open science

Modélisation, identification et simulation de la densification par diffusion solide des alliages métalliques et applications au frittage de poudres

Jean-Claude Gelin, Jiupeng Song, Thierry Barriere, Baoshung Liu

► **To cite this version:**

Jean-Claude Gelin, Jiupeng Song, Thierry Barriere, Baoshung Liu. Modélisation, identification et simulation de la densification par diffusion solide des alliages métalliques et applications au frittage de poudres. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01492144

HAL Id: hal-01492144

<https://hal.science/hal-01492144v1>

Submitted on 18 Mar 2017

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

Modélisation, identification et simulation de la densification par diffusion solide des alliages métalliques et applications au frittage de poudres

Jean-Claude Gelin* — Jiupeng Song ** — Thierry Barriere *
Baosheng Liu **

* Institut Femto-ST/LMA, ENSMM

26 Rue de l'Épitaphe, 25030, Besançon, France

{jean-claude.gelin, jiupeng.song, thierry.barriere}@ens2m.fr

** Department of Applied Mechanics, Southwest Jiaotong University

610031, Chengdu, Sichuan, P. R. China

RÉSUMÉ. Un modèle de comportement de type viscoplastique est formulé pour représenter la densification par diffusion à l'état solide de poudres métalliques ou céramiques. Le modèle est ensuite implémenté dans un logiciel de simulation par élément finis, et ces paramètres de modèle sont identifiés par comparaison entre résultats expérimentaux et résultats de simulation obtenus sur des éprouvettes types des densification. Le modèle physique ainsi identifié, ainsi que la procédure de simulation par élément finis sont ensuite utilisés dans le cadre de simulation 3D de composants obtenus par moulage par injection de poudres en prenant en compte la gravité, le frottement, ainsi que la distribution initiale hétérogènes des poudres. Les résultats de simulation obtenus corroborent les résultats expérimentaux, validant ainsi que le modèle physique et la procédure de simulation.

ABSTRACT. A viscoplastic material model is firstly formulated for accounting the solid state sintering of metallic or ceramic powders. Then the proposed model is implemented into a commercial FE simulation code, then material and physical parameters are identified by comparison between experimental results and numerical ones, for different sintering experiments. The resulting identified model and the associated finite element procedure are then used for the simulation of 3D complex shapes, resulting from powder injection moulding process. The results obtained from 3D FE simulations accounting the effects of gravity, friction and initial heterogeneous powder volume fraction are in good agreement with the experimental ones, proving the validity of the proposed model and identification strategy.

MOTS-CLÉS: Moulage par injection métallique, densification, modélisation, identification.

KEYWORDS: metal injection moulding, sintering, modeling, identification.

1. Introduction

L'étape de densification est l'une des étapes les plus importantes du procédé de moulage par injection de poudres (MIP), dans laquelle le squelette de poudres obtenu après les étapes de moulage et de déliantage est densifié par diffusion solide pour aboutir à la forme géométrique escomptée et aux propriétés mécaniques souhaitées. Dans cette étape, le composant est sujet à un retrait dimensionnel important, de l'ordre de 12 à 20% (German, 1997). Un retrait anisotrope peut être provoqué par la gravité, le frottement entre le composant et son support, une distribution de densité non homogène due au phénomène de ségrégation se produisant au cours de l'étape de moulage (Barriere, 2001). Afin de modéliser la densification par diffusion solide, une loi de densification est proposée, puis implémentée dans le logiciel Abaqus[®], via la subroutine UMAT. Des comparaisons expériences-simulations sont proposées pour un mélange de poudres de 316L à déliantage thermique. Les paramètres matériaux sont proposés par des essais de fluage et de dilatométrie. L'influence des facteurs décrits dans le paragraphe précédent est prise en compte dans les simulations numériques. Deux cas tests sont traités, concernant des éprouvettes de traction et un volant afin de comparer les résultats numériques et expérimentaux en termes de retrait, contrainte élastique et à la rupture. Les résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux afin de valider le modèle et l'ensemble des méthodes numériques employées.

2. Modèle de densification

2.1. Loi de comportement pour la densification

A des températures élevées correspondantes aux températures de densification par diffusion solide, les matériaux polycristallins sont soumis aux mécanismes de diffusion lesquels peuvent être considérés comme un mécanisme de déformation par fluage (German, 1996). Une loi de comportement viscoplastique peut donc être utilisée pour prédire le retrait et les distorsions du composant durant l'étape de densification. Elle s'écrit sous la forme suivante:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{vp} = \frac{\boldsymbol{\sigma}'}{2G_p} + \frac{\text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) - 3\sigma_s}{9K_p} \mathbf{I} \quad [1]$$

où $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{vp}$ est le tenseur des taux de déformation viscoplastique, $\boldsymbol{\sigma}'$ est déviateur du tenseur des contraintes, $\text{tr}(\boldsymbol{\sigma})$ est la trace du tenseur des contraintes, \mathbf{I} est le tenseur d'identité du second ordre, G_p est le module de viscosité de cisaillement, K_p est le module de viscosité associé à la compressibilité, σ_s est la contrainte de densification qui pilote le procédé de densification. G_p , K_p et σ_s sont des paramètres matériaux qui doivent être identifiés. Ils dépendent de la variation de la densité relative, de la température et de la taille des grains de poudres.

2.2. Modules de viscosité de cisaillement et de compressibilité

L'analogie élasticité viscosité est utilisée pour déterminer les modules de viscosité des matériaux densifiés (Bordia, 1988). Les modules de viscosité de cisaillement et de compressibilité s'écrivent sous les formes suivantes:

$$G_p = \frac{\eta_z}{2(1 + \nu_{vp})}, K_p = \frac{\eta_z}{3(1 - 2\nu_{vp})}, \nu_{vp} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho}{3 - 2\rho}} \quad [2]$$

où η_z et ν_{vp} sont respectivement la viscosité axiale et le module visqueux du matériau poreux tandis que ρ est la densité relative du matériau poreux.

Le phénomène de diffusion aux joints de grains est l'un des mécanismes le plus important pendant l'étape de densification d'un composant MIM. Selon le modèle de fluage proposé par Coble, et en rapport avec la mécanique des matériaux poreux, la viscosité axiale peut être exprimée sous la forme (Song et al., 2006):

$$\eta_z = \frac{kTG^3\rho^2}{\Omega D_{b0} \exp(-Q_b / RT)} \quad [3]$$

où k est une constante, T est la température absolue, G est la taille du grain, Ω est le volume atomique, D_{b0} est le coefficient de diffusion aux grains de frontière, Q_b est l'énergie d'activation de diffusion aux grains de frontière, R est la constante des gaz parfaits. L'évolution de la croissance des grains de poudres d'acier inoxydable 316L est déterminée par la méthode proposée par Song et al. (Song et al., 2006).

2.3. Contrainte de densification

Selon l'expression proposée par Olevksy (Olevsky, 1998), la contrainte de densification est proportionnelle au carré de la densité et inversement proportionnelle au rayon moyen des particules, et s'exprime sous la forme:

$$\sigma_s = \frac{C\rho^2}{r} \quad [4]$$

où r est le rayon moyen des particules tandis que, C est une constante à identifier.

2.4. Propriété mécanique après la densification

Pour les matériaux poreux, les expressions suivantes ont été proposées pour estimer la contrainte élastique σ_y et la contrainte à rupture σ_{UTS} pendant et après l'étape de densification (Suri, 2003):

$$\sigma_y = \sigma_y^0 \frac{1-\theta}{K_c}, \sigma_{UTS} = \sigma_{UTS}^0 \frac{1-\theta}{1+\alpha_s(K_c-1)\theta} \quad [5]$$

où σ_y^0 et σ_{UTS}^0 sont respectivement la contrainte élastique et la contrainte à la rupture de l'alliage de référence dense, $\theta = 1 - \rho$ est le facteur de porosité, K_c est le facteur de concentration et α_s est une constante. La détermination de K_c a été explicitée dans Suri et al (Suri, 2003).

3. Identification des paramètres du modèle

Des tests de fluage avec des composants de type éprouvette de flexion sont réalisés dans un four de densification sous vide. Ils servent à identifier les paramètres de viscosité axiale pour déterminer la constante $A = k/\Omega D_{b0}$ (Gelin, 2006). L'énergie d'activation de la diffusion aux grains de frontière Q_b est fixée à 167 kJ/mol (German, 1996). La seconde identification est basée sur l'évolution du retrait obtenu par des essais de dilatométrie pendant le cycle de densification afin de déterminer le paramètre C (Gelin, 2006). Le cycle de densification, pour le mélange de poudres de 316L à déliantage thermique, est constitué d'une montée dynamique à 8°C/min jusqu'à 1360°C suivi par un temps de maintien d'une heure. Le mélange est caractérisé par un diamètre moyen de poudres de 16 µm et un chargement initial de 0.62. Cette méthode est réalisée sur 3 intervalles distincts en fonction de la valeur de la densité. Le résultat de l'identification des paramètres A et C est résumé Tableau 1. La viscosité axiale et le retrait, basés sur les modèles présentés et identifiés par les essais de dilatométrie et de fluage au cours de l'étape de densification, sont donnés Figure 1.

Tableau 1. Paramètres identifiés pour la nuance de 316L à déliantage thermique

Intervalle de densité (étape de densification)	A (Pa.s/(m ³ .K))	C (N/m)
0.000 < ρ ≤ 0.645	5.19×10^{15}	0.696
0.645 < ρ ≤ 0.930	1.97×10^{15}	6.454
0.930 < ρ ≤ 1.000	16.1×10^{15}	1.640

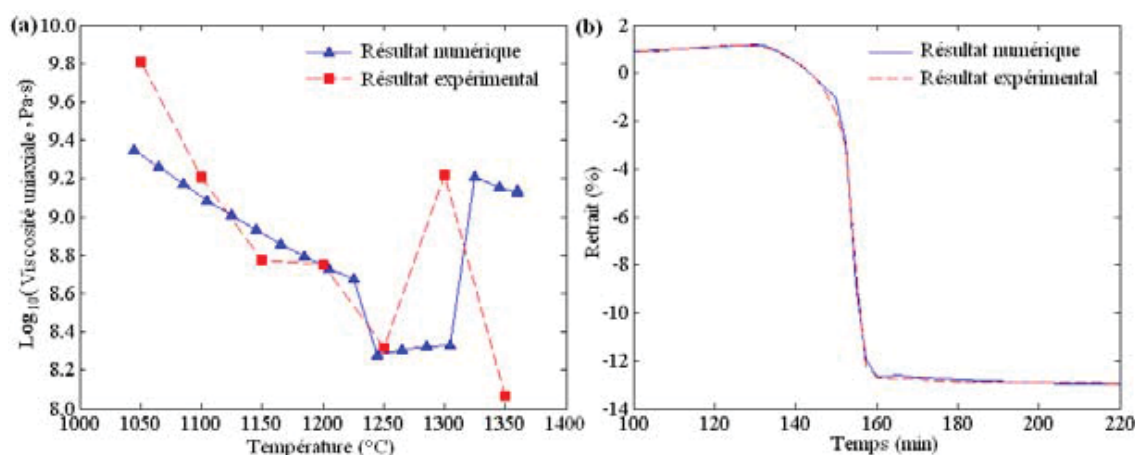


Figure 1. Viscosité axiale et retrait identifiés obtenus entre le modèle et les résultats expérimentaux, (a) viscosité axiale et (b) le retrait.

4. Simulation numérique

Le logiciel Abaqus[®] est choisi pour simuler l'étape de densification par diffusion à l'état solide en considérant un couplage thermo-mécanique. Le modèle présenté au paragraphe 2 est implémenté dans la subroutine utilisateur UMAT. Les paramètres identifiés sont utilisés dans les simulations numériques. La gravité, la fraction volumique de poudres et le frottement avec le support sont pris en compte dans la simulation numérique. La distribution hétérogène de la densité initiale de poudres est issue du résultat donné par la simulation éléments finis de remplissage utilisant une modélisation bi-phasique et le code Feapim[®] (Barriere, 2001). L'exemple concerne un volant possédant une grande surface (diamètre extérieur de plus de 50 mm) pour le procédé MIM. La densité initiale obtenue après simulation de la phase d'injection et la densité finale obtenue par simulation en utilisant le modèle exposé précédemment sont données Figure 2.

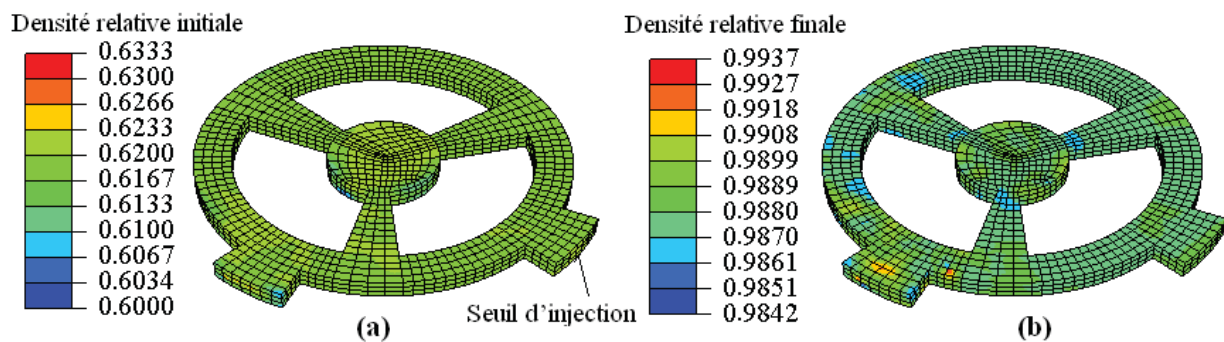


Figure 2. Evolution de la densité relative du composant obtenue par simulation: (a) avant la densification, (b) après la densification.

Les tests de traction sont effectués à différentes températures pour estimer les propriétés mécaniques (Gelin, 2006). La contrainte obtenue au cours de l'essai de traction est comparée à celle obtenue numériquement, Figure 3.

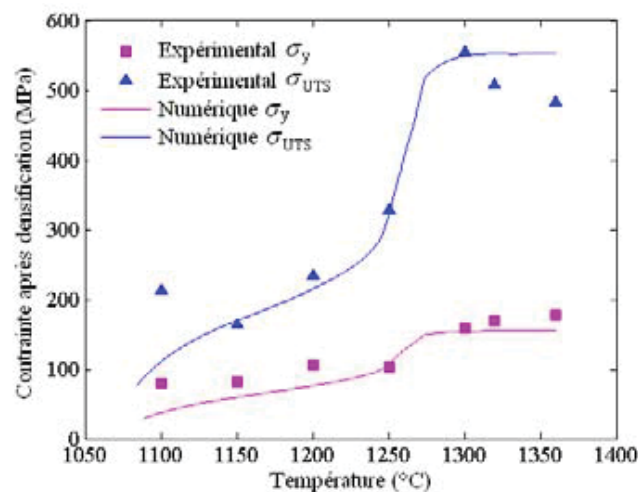


Figure 3. Comparaison entre simulations et expérimentation pour la contrainte élastique limite et la contrainte à rupture par à différentes températures de densification.

5. Conclusions

Un modèle phénoménologique basé sur une loi de comportement viscoplastique est utilisé pour représenter densification par diffusion à l'état solide des poudres métalliques est présenté. Le modèle a été implémenté dans un logiciel de simulation par éléments finis afin de permettre l'identification paramétrique du modèle par comparaison calcul. Les différents paramètres matériaux utilisés ont été identifiés au cours d'essais de dilatométrie et de fluage. Les simulations réalisées avec les paramètres ainsi identifiés compte d'un couplage thermique, de la gravité, du frottement avec le support. Les gradients de densité issus des étapes de mélangeage ou de moulage par injection ont été pris en compte dans la simulation numérique. L'évolution des retraits anisotropes, de la densité finale et des contraintes élastiques ont été simulés et à la rupture de composants au cours de l'étape de densification a été réalisée pour un composant de type volant et éprouvette de traction. Les simulations numériques sont en bon accord avec les résultats expérimentaux, prouvant ainsi la pertinence du modèle physique densification et de la l'identification paramétrique associé.

Bibliographie

- Barriere T., Gelin J.C., Liu B., « Experimental and numerical analyses of powder segregations on the properties and quality of parts produced by MIM », *Powder Metall.*, vol. 44, n° 3, 2001, p. 228-234.
- Bordia R.K., Scherer G.W., « On constrained sintering-I Constitutive model for a sintering body », *Acta Metall.*, vol. 36, n° 9, 1988, p. 2393-2397.
- Gelin J.C., Barriere T., Song J., Liu B., « Experimental Investigations and Numerical Modelling of Sintering Process for 316L Stainless Steel MIM Components », *International Conference on Powder Injection Molding of Metals, Ceramics and Carbides*, 20-22 March 2006, Florida, USA.
- German R.M., *Sintering theory and practices*, New York, John Wiley, 1996.
- German R.M., Bose A., *Injection moulding of metal and ceramics*, Princeton, MPIF, 1997.
- Olevsky E.A., « Theory of sintering: from discrete to continuum », *Mat. Sci. Eng. R*, vol.23, 1998, p. 41-100.
- Song J., Gelin J.C., Barriere T., Liu B., « Experiments and numerical modelling of solid state sintering for 316L stainless steel components », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 177, 2006, p.352-355.
- Suri P., Heaney D.F., German R.M., « Defect-free sintering of two material powder injection molded component Part II. Model », *J. Mater. Sci.*, vol. 38, 2003, p.4875-4881.