



Prévision des paramètres des cycles de densification par compression isostatique à chaud de poudre de Tungstène

Rabah LAIDI*, Locif REDOUANI^b

a,b

Université Chadli Bendjedid - El Tarf Faculté des Sciences et de la Technologie, Laboratoire de physico-chimie des matériaux, El Tarf Algérie, 36000.

Informations

Résumé

Mots clés :

CIC compaction de poudre
densification de poudre diagrammes
de densifications mécanisme de
densification.

Ce travail consiste en la modélisation du procédé de compression isostatique à chaud (CIC), en vue d'une compréhension approfondie des différents mécanismes physiques et mécaniques impliqués dans la densification de poudre. Le modèle est formulé après une étude détaillée des différentes équations qui décrivent chaque mécanisme. A partir de données issues de simulations microscopiques du mécanisme CIC pour le cas de particules de poudre de tungstène, des traitements numériques ont été réalisés et un nouveau type de diagramme de densification est ainsi réalisé.

Correspondance :

alaidirahah@gmail.com

locifredouani@gmail.com

Re le : Révisé le : Acce té le :

1. Introduction

Cette étude a pour objet d'exploiter la modélisation numérique de la compaction isostatique à chaud (CIC, Hot Isostatic Pressing HIP) de façon à pouvoir mettre en œuvre de nouvelles cartes de densification.

La CIC est un procédé d'élaboration de pièces métalliques ou céramiques à partir de poudres. Par cette technique, on cherche à obtenir des pièces, de microstructure uniforme et contrôlée, de tailles variables et de formes plus ou moins complexes.

La poudre à densifier est introduite dans un moule, appelé conteneur, beaucoup plus malléable que le matériau de base de la poudre. Le conteneur est ensuite sellé et mis dans une enceinte haute pression.

Une pression et une température sont alors appliquées simultanément et progressivement jusqu'à atteindre les paramètres de traitement suivant un cycle opératoire bien déterminé.

Dans la CIC, la modélisation du processus de densification de la poudre est très

complexe vu le grand nombre de phénomènes physiques qui peuvent intervenir simultanément ou successivement. Il y a lieu ainsi de faire un aperçu sur ces mécanismes dont les équations sont utilisées pour établir les diagrammes de densification qui permettent de prévoir la densité relative des comprimés et les paramètres des cycles opératoires.

2. Modélisation de la CIC

Dans ce travail nous allons adopter l'approche micromécanique qui consiste à assimiler les agrégats de poudres à des empilements aléatoires denses (EAD) de particules sphériques monodimensionnelles. Cette théorie n'est pas évidemment réaliste mais permet de simplifier considérablement l'étude de la densification des poudres.

2.1 Etude des EAD

L'évolution de la morphologie des particules permet de diviser la densification en deux étapes. Le stade I, où la densité relative D

est comprise entre 0,64 et 0,92, caractérisé par une porosité ouverte et interconnectée et le Stade II avec une densité qui évolue de 0,92 à 1 et où la porosité est fermée et de forme sphérique [1-3].

Les paramètres de densification, soient le nombre de coordination (Z), la surface de contact (a) et la pression efficace (P_{eff}), sont évalués par plusieurs auteurs [2-51]. Ils permettent de calculer les équations des différents mécanismes susceptibles de contribuer à la densification.

Tab.1 Tableau récapitulatif des expressions des paramètres des EAD.

Paramètre de l'EAD	Stade I : 0,64 ≤ D ≤ 0,92	Stade II : 0,92
Nombre de coordination	Z=12D	z -12
Surface moyenne de contact	$a = \frac{2\pi}{3} \left(\frac{D - D_0}{D_0} \right)$	$a = \frac{\pi R^2}{3} \left[1 - 5 \left(\frac{1-D}{5D} \right)^{2/3} \right]$
Pression efficace	$P_{eff} = \frac{D_0}{2D(D - D_0)}$	$P_{eff} = \frac{1}{1 - 5 \left(\frac{1-D}{5D} \right)^{2/3}} P$

2.2 Mécanismes de densification

La modélisation du processus CIC est basée sur l'évaluation des contributions à la densification des mécanismes de déformation et de transport de matière en fonction des paramètres de densification (temps, pression et température). Dans

l'approche microscopique (micromécanique), les mécanismes concernés sont l'écoulement plastique, le fluage en loi de puissance, les mécanismes de diffusion (diffusion intergranulaire et diffusion en volume à partir des joints de grains) et de l'écoulement diffusif (fluage de Nabarro-Herring et Coble) [6]. Ce dernier mécanisme n'est pas considéré dans notre cas, car la condition principale pour qu'il puisse intervenir durant la densification est que la taille des grains cristallographiques soit négligeable devant celle des particules de poudre, or cette condition n'est pas vérifiée dans le cas du

tungstène qui constitue l'objet de notre application.

On admet que la déformation plastique a lieu quand la pression efficace exercée sur un contact est supérieure ou égale à la valeur limite 30y. Ainsi, l'expression de la contribution de la déformation plastique est évaluée par [21]:

$$ADY = Dy - Do = L^2 L^{1/2} - 1] \quad (1)$$

300 Ty La

quantité Dy représente la densité relative atteinte dans le comprimé après déformation plastique des contacts entre les particules.

Les autres mécanismes contribuent à la densification durant le palier du cycle CIC. Dans cette étape, l'agrégat de poudre est soumis à l'action de la pression appliquée sous l'effet d'une température élevée.

Au stade I, les équations des vitesses de fluage en loi de puissance, de diffusion intergranulaire et de diffusion en volume sont exprimées successivement par [2,71]

$$\dot{D} = 2A \left(\frac{D_0}{D} \right)^{1/3} \left[\frac{D(D-D_0)}{D_0} \right]^{1-n} \left(\frac{P}{6} \right)^n \quad (2)$$

$$\dot{D} = 72 \frac{\delta D_b \Omega}{KTR^3} \frac{D_0^{5/3} D^{1/3}}{(D-D_0)g(D)} P \quad (3)$$

$$\dot{D} = 59 \frac{D_V \Omega}{KTR^2} \frac{D_0^{1/3} D^{2/3}}{(D-D_0)^{1/2} g(D)} P^{7/6} \quad (4)$$

Avec :

$$g(D) = \left[\left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/3} - 1 \right]^{113} \quad (5)$$

où 7.027.3 est le nombre de coordination initial et CE15.5 est une constante.

Au stade II, elles sont exprimées successivement par [2,7,8]:

$$\dot{D} = \frac{3}{2} A \frac{D(1-D)}{[1-(1-D)^{1/n}]^n} \left(\frac{3}{2n} P \right)^n$$

$$\dot{D} = 27 \frac{\delta D_b \Omega}{KTR^3} \left\{ D^2 / \left[1 - 5 \left(\frac{1-D}{5D} \right)^{2/3} \right] \right\} P$$

$$15 \frac{D_V \Omega}{KTR^2} \left\{ D^2 \left(\frac{1-D}{5D} \right)^{1/3} / \left[1 - 5 \left(\frac{1-D}{5D} \right)^{2/3} \right] \right\} P \quad (6)$$

$$(7)$$

$$(8)$$

3. Simulation numérique

La méthode utilisée est celle habituellement utilisée par les artisans de l'approche micromécanique [4-6]. Elle consiste à considérer que la densification des poudres par CIC est déclenchée par la déformation plastique qui s'opère au début du palier du cycle CIC. Ensuite, les autres mécanismes, dépendant du temps, interviennent jusqu'à la fin de la densification.

Le programme de simulation est établi en calculant d'abord la densité relative après déformation plastique. Ensuite, l'incrémentation est effectuée par itération avec un intervalle de temps $\Delta t=1$, où les contributions des autres mécanismes sont additionnées à la densité calculée précédemment. Des tests sont effectués à chaque fois afin de déterminer lesquelles des équations du Stade I ou stade II à utiliser [2].

4. Résultats et discussions

Les figures 1 et 2 représentent un nouveau type de diagrammes de densification que nous proposons pour prévoir les paramètres à choisir (température, pression et temps) afin d'aboutir une densité relative voulue.

Dans le premier type de diagrammes (Fig. 1), la pression de traitement est représentée en fonction de la température pour

différents temps de traitement afin d'obtenir une densification complète de la poudre de tungstène.

Dans le deuxième type (Fig. 2), la pression est donnée en fonction du temps pour différentes températures.

Il est utile de signaler que ce genre de diagramme est très intéressant, notamment pour les industriels, car il permettra de réduire les tests de mise au point et par la même occasion de faire des économies en temps, donc en énergie.

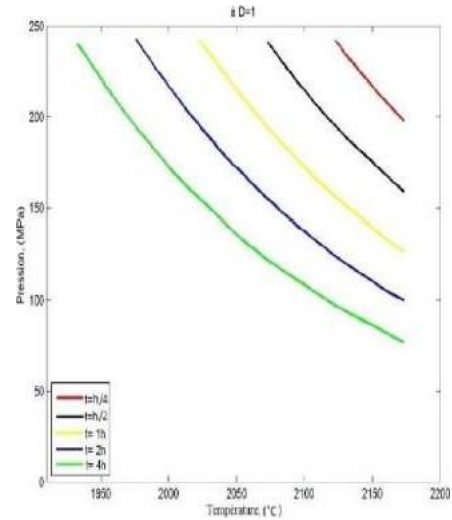


Fig. 1. Diagramme de densification par CIC de poudre de tungstène représentant la variation de la pression en fonction de la température pour différents temps de traitement afin d'obtenir une densité relative complète.

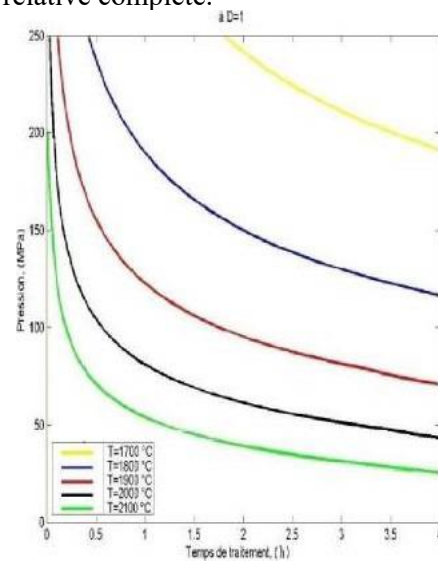


Fig. 2. Diagramme de densification par CIC de poudre de tungstène représente la variation de la pression en fonction du temps de traitement pour différentes température du palier de cycle opératoire pour une densité DEI.

Dans le cadre de l'analyse des résultats des simulations numériques du procédé CIC, nous avons effectué des comparaisons avec des données expérimentales trouvées dans la littérature pour la poudre de tungstène

Les mêmes comparaisons sont réalisées sur deux les deux figures 3 et 4 (respectivement

en fonction de la température et en fonction du temps).

Les résultats de simulation ont été confrontés à des mesures directes de densification tirées de la littérature et concernant la poudre à base de tungstène.

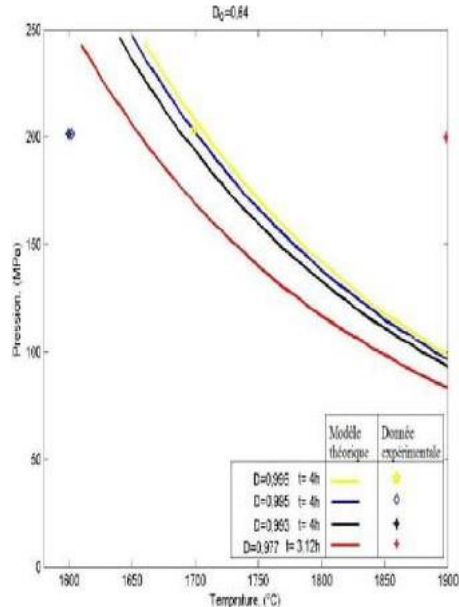


Fig.3. Comparaison des prévisions théoriques des simulations CIC aux données expérimentales de poudres de tungstène pour différentes densités avec des courbes représentant la pression en fonction de la température.

Nous cherchons par-là, à démontrer que le choix préalable dans les expériences des paramètres de densification pourrait donner des résultats erronés, En effet, les comparaisons que nous avons effectuées montrent qu'une seule mesure expérimentale est prévue par la théorie, soit la densité relative D=0,996 à 1700 °C. Cela peut s'expliquer par le fait qu'en pratique, on ne sait pas dans quelles conditions peut-on avoir la densité voulue, alors qu'il suffit de changer un paramètre (température ou pression) pour enclencher un important gradient de densité.

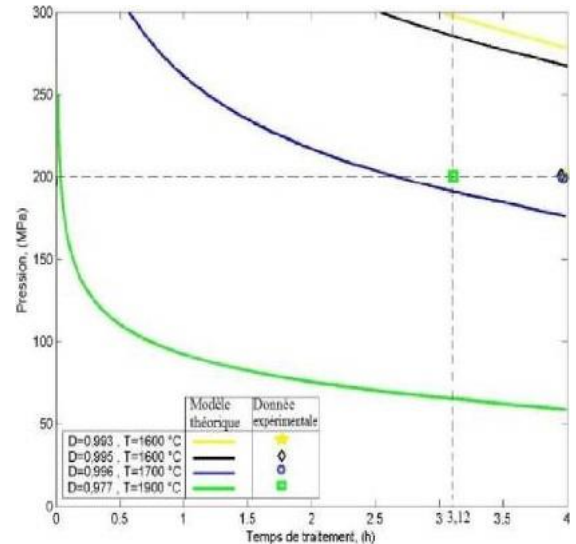


Fig. 4. Comparaison des prévisions théoriques des simulations CIC aux données expérimentales de poudres de tungstène pour différentes densités avec des courbes représentant la pression en fonction de temps.

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé un nouveau type de digram mes de densification de poudres métalliques par le procédé CIC. Ces diagrammes peuvent prévenir les paramètres (pression et température) des cycles opératoires à utiliser en fonction de temps pour l'obtention de densité voulue.

Il est constaté que ces diagrammes sont très utiles vu les informations que peuvent offrir.

Par ailleurs, des écarts importants entre les données expérimentales et les prévisions théoriques sont révélés par les résultats. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ces écarts, tels que le manque de fiabilité des valeurs des constantes de matériau de base des poudres, la négligence de l'étape de montée en pression et en température dans les simulations, l'influence des conditions de départ (densité relative initiale, taille des particules, etc.) sur les densités finales des comprimés et enfin, la distribution aléatoire de la taille des particules de poudres, etc.

References :

[1] Boudrahem, S., Grosbras, M. (1999) Évolution de la morphologie des pores durant la compression isostatique à chaud de

poudres sphériques. Mater. Tech. 87: 2 1—24.

[21] Redouani, L., Boudrahem, S, (2012) Hot isostatic pressing process simulation : application to metal powders. Can. J. Phys. 90: 573-583.

[31] Redouani, L., Boudrahem, S., Alem, S. (2019) New hot isostatic pressing (HIP) simulation method With taking into account of the operating cycle ramp. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 102: 3291-3299.

[4] Arzt, E., Ashby, M. F., Easterling, K.E. (1983) Practical applications of Hot Isostatic Pressing Diagrams: Four case studies, Metall. trans. A. 14A: 211-220.

[5] Helle, A.S., Easterling, K.E., Ashby, M.F. (1985) Hot-isostatic pressing diagrams: new developments. Acta. Metall. 33: 2163— 2174.

[6] Ashby, M.F. (1974) A first report on sintering diagrams, Acta Metall. 22 : 275289.

[71] Redouani, L. (2013) Nouvelle approche de la modélisation de la densification de poudres par compression isostatique à chaud. thèse de doctorat. Université de Béjaia. Algérie.

[81] Wilkinson, S., Ashby, M. F. (1975) Pressure sintering by power law creep. Acta. Metall. 23: 1277-1285.

[9] Jasper, B., Coene, J.W., Riesch, J., Höschen, T., Bram, M., Linsmeier, C. (2015) Powder Metallurgical Tungsten FiberReinforced Tungsten. Materials Science Forum. 825-826 : 125-133.

Boltzmann n Exposant de fluage en loi de puissance

R Rayon moyen des particules de poudre

T Température

δ Epaisseur de joint de contact Ω Volume atomique

Limite élastique du matériau

Liste des symboles

A Constante de fluage en loi de puissance

A' Constante de Dorn b

Vecteur de Burger

D Densité relative

D_0 Densité relative initiale

D Coefficient de diffusion intergranulaire

D Coefficient de diffusion en volume K Constante de