Elaboration, par une approche sur VER, d'un modèle à champ moyen pour la prédiction de la refermeture de pores lors de la déformation à chaud de métaux

Abdelouahed Chbihi, Michel Saby, Marc Bernacki, Pierre-Olivier Bouchard

▶ **To cite this version:**

Abdelouahed Chbihi, Michel Saby, Marc Bernacki, Pierre-Olivier Bouchard. Elaboration, par une approche sur VER, d'un modèle à champ moyen pour la prédiction de la refermeture de pores lors de la déformation à chaud de métaux. CSMA 2015 - Le 12ème Colloque National en Calcul des Structures, École Centrale de Nantes: GeM, ENSTA Brest: LMBS, INSA Rennes: LGCGM, Arts et Métiers ParisTech Angers: LAMPA, Université de Bretagne-Sud Lorient: LIMATB, Université de La Rochelle: LASIE, May 2015, Giens, France. hal-01247751

HAL Id: hal-01247751

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01247751

Submitted on 22 Dec 2015

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.

Elaboration, par une approche sur VER, d'un modèle à champ moyen pour la prédiction de la refermeture de pores lors de la déformation à chaud de métaux

A. Chbihi[1], M. Saby[1,2], M. Bernacki[1], P.-O. Bouchard[1]

[1] *Mines ParisTech, PSL – Research University, CEMEF – Centre de mise en forme des matériaux , CNRS UMR 7635, CS 10207, 06904 Sophia Antipolis Cedex, France*
[2] *Ascometal CREAS, Avenue de France - BP 70045, 57301 Hagondange Cedex, France*

Résumé — Dans une pièce métallique, des pores résiduels non désirés sont toujours présents après les opérations de fonderie. Pour refermer ces pores de taille généralement négligeable par rapport à la taille de la pièce, les industriels utilisent des procédés à chaud tels que le forgeage libre ou le laminage. Dans la littérature, plusieurs modèles à champ moyen prédictifs en terme d'évolution du volume des pores traitent de cette problématique. Récemment un nouveau modèle à champ moyen, appelé Cicaporo[4], a été élaboré et continue d'être amélioré afin de modéliser la refermeture des pores. Ce modèle se base sur une approche multi-échelles[2] utilisant des simulations sur Volume Elémentaire Représentatif (VER). La plupart des modèles classiques étudient la refermeture en fonction de la triaxialité des contraintes et de la déformation plastique équivalente. Pour l'élaboration du modèle Cicaporo, les effets de la morphologie des pores et de leur orientation dans la matrice ont été investigués.
Mots clés — Refermeture de porosité, approche multi-échelle, procédés mise en forme à chaud

1. Intoduction

La refermeture des pores est une pratique indispensable après l'obtention de lopins en fonderie pour les industriels. Actuellement, la maîtrise du mécanisme de refermeture reste indussisante à l'échelle de la pièce. Dans la littérature, il existe quelques modèles à champ moyen qui traitent de cette problématique mais qui restent très limités vis-à-vis des hypothèses restrictives utilisées. Ces modèles restent néanmoins limités vis-à-vis des paramètres pris en compte et de la complexité du problème. Dans le cadre de cette étude les modèles à champ moyen s'entendent comme modèles utilisés à l'échelle de la pièce dans les codes de calcul EF en mise en forme des matériaux (modèles évalués aux points d'intégration sans description explicite des pores de la microstructure). Le mécanisme en question étant en effet principalement étudié en fonction de la triaxialité des contraintes sur la base de pores sphériques. Le travail récent réalisé par Saby et al.[5] a permis de démontrer l'importance de la prise en compte de deux paramètres supplémentaires dans l'étude de la refermeture et l'élaboration du modèle *Cicaporo*: l'orientation et la morphologie des pores. Un autre paramètre, le paramètre de Lode μ, a été étudié dans le cadre de cette étude afin d'améliorer encore ce modèle.

2. Modélisation du mécanisme de refermeture

Les modèles à champ moyen, prédictifs de la refermeture à chaud de pores, les plus connus sont:

- Le modèle STB[3] (Stress Triaxiality Based). Il se base sur la triaxialité des contraintes et est défini par Eq. (1)

$$\frac{V}{V_0} = K_c . T_X . \Delta\bar{\epsilon}, \ \forall T_X < 0, \quad (1)$$

où T_x est la triaxialité des contraintes, K_c est une constante prédéfinie (K_c=5 par défaut, obtenue par des essais de compression sur VERs avec une porosité sphérique) et V_0 (resp. ΔV) correspond au volume initial (resp. à la variation de volume) de la porosité

- Le modèle de Zhang[6] qui se base sur l'évolution du volume de la porosité (Eq. 2) en fonction de la triaxialité des contraintes, un paramètre matériau m (sensibilité à la vitesse de déformation) et des termes correctifs (q_1, q_2, q_3 et q_4) calibrés à partir de données expérimentales

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\left[\frac{3}{2}\left[-\frac{3}{2n^*}T_X + \frac{(n^*-1)(5n^*+2)}{5(n^*)^2}\right]^{\frac{1}{m}} - q_1 T_X + 3q_2\bar{\epsilon}^2 + 5q_3\bar{\epsilon}^4 + q_4\right]\Delta\bar{\epsilon} \quad (2)$$

Le modèle *Cicaporo* a lui été élaboré par une approche multi-échelles. En effet l'ensemble des paramètres du modèle ont été construits en fonction de campagnes "d'essais numériques" à l'échelle d'un VER. La porosité de la microstructure est ainsi prise en compte dans le modèle sous la forme de paramètres morphologiques et d'orientation (ellipsoïdes équivalents). L'évolution du volume de la porosité est définie dans le modèle par la formule suivante:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = [B + 2C\bar{\varepsilon}]\Delta\bar{\varepsilon}, \quad \text{avec} \quad \begin{cases} B = \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=0}^{2}\sum_{k=0}^{1} b_{jk}(T_X)^k(\gamma_i)^j p_i \\ C = \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=0}^{2}\sum_{k=0}^{2} c_{jk}(T_X)^k(\gamma_i)^j p_i \end{cases} \quad (3)$$

, avec p_i et γ_i les paramètres d'orientation et de morphologie :

$$\gamma_{i\,1\le i\le 3} = \sqrt[3]{V_0}\Big/ r_i \qquad\qquad p_{i\,1\le i\le 3} = (\overrightarrow{u_i}.\overrightarrow{e_i})^2$$

Les paramètres b_{jk} et c_{jk} sont des constantes de calibration identifiées à partir des simulations sur VERs[4] (r_i, $\overrightarrow{u_i}$ et $\overrightarrow{e_i}$ sont définis sur la figure 1).

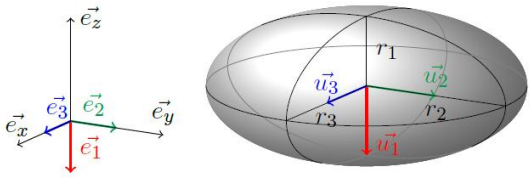

Figure 1 : Définition des paramètres de la géométrie et de l'orientation

3. Application au procédé du laminage:

3.1. Validation du modèle à champ moyen

Un cas de laminage sur un matériau industriel est présenté. Une simulation EF très couteuse (maillage EF très raffiné près des pores) dite de référence a été réalisée en introduisant explicitement 9 pores de formes variées dans des endroits différents de la pièce. Trois simulations à champ moyen ont été effectuées correspondant aux trois modèles présentés. Dans le modèle *Cicaporo*, la morphologie et l'orientation des porosités sont prises en compte.

La figure 2 présente l'évolution du volume de refermeture de porosité de la simulation explicite et des trois modèles. Le modèle *Cicaporo* (ligne rouge) est ici beaucoup plus précis que les autres modèles. Il a une tendance de surestimation par rapport à la simulation explicite. Une déviation de 17% pour le cas A1 et moins de 7% pour tout le reste des cas a été observée. Le modèle STB (ligne continue noire) a tendance à surestimer la refermeture pour les cas (A1, B1, C1, E1) où les ellipsoïdes sont allongés

perpendiculairement au sens de l'écrasement. Dans les cas (A2, B2, C2, E2) où les ellipsoïdes sont allongés dans la direction de la déformation, le modèle sous-estime la refermeture. Le modèle de Zhang (ligne noire discontinue) est le moins exacte des trois modèles présentés. Sa déviation pour les cas (A2, B2, C2, E2) est très importante (de 40% à 88%), alors qu'il est plus exact pour les autres cas

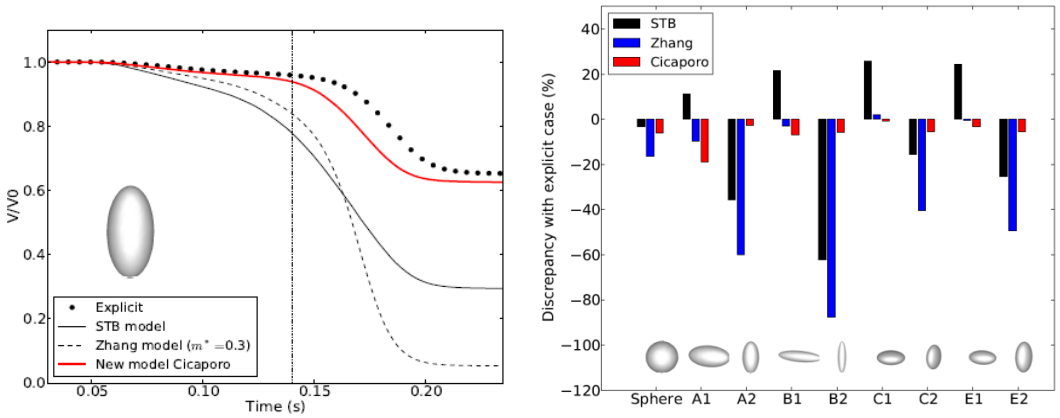

Figure 2 : a) Evolution du volume de l'ellipsoïde A2 pour les trois modèles et la simulation explicites. b) Déviation finale de la refermeture de porosités pour les trois modèles et pour les 9 ellipsoïdes.

3.2. Limitations et perspectives

Les résultats présentés dans le paragraphe précédant illustrent l'intérêt du modèle Cicaporo. Ce modèle reste cependant perfectible vis-à-vis des hypothèses adoptées pour son élaboration. En effet, pour sa construction, une hypothèse d'axisymétrie du chargement (adoptée dans toutes les approches sur VER trouvées dans la littérature) a été considérée sur les simulations de calibration sur VERs. Afin de ne plus utiliser cette hypothèse, un nouveau paramètre, dit paramètre de Lode μ (Lode 1926[1]), est considéré afin de définir un état de contrainte exact et unique :

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3\,.\,\bar{\sigma}} \\ \bar{\sigma} &= \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2}{2}} \\ \mu &= \frac{2\sigma_2-\sigma_1-\sigma_3}{\sigma_1-\sigma_3} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \sigma_1 = \bar{\sigma}\left[T_x - \frac{\mu-3}{3\sqrt{\mu^2+3}}\right] \\ \sigma_2 = \bar{\sigma}\left[T_x + \frac{2\mu}{3\sqrt{\mu^2+3}}\right] \\ \sigma_3 = \bar{\sigma}\left[T_x - \frac{\mu+3}{3\sqrt{\mu^2+3}}\right] \end{cases} \qquad (5)$$

σ_1, σ_2 et σ_3 sont les contraintes principales dans les trois directions.

Grâce à ce nouveau paramètre, la définition de l'état de contrainte peut être faite d'une manière exacte et unique. Ainsi, l'effet du paramètre de Lode sur la refermeture peut être analysé et introduit dans le modèle de refermeture en complément du paramètre de triaxialité des contraintes.

Un autre axe important d'amélioration du modèle réside dans son caractère scalaire. En effet, le modèle *CicaPoro* permet actuellement de prédire l'évolution du volume des pores mais pas l'évolution de leur morphologie. Or, cette information est primordiale pour un processus de refermeture en plusieurs passes et selon différentes directions, ce qui est souvent utilisé dans l'industrie pour les procédés multi-passes. Ainsi, un modèle *Cicaporo* tensoriel est en cours d'élaboration.

La figure 3 montre l'influence du changement de la direction de compression sur la refermeture d'un pore initialement sphérique. Il apparaît clairement qu'en changeant l'axe d'écrasement la refermeture devient plus lente. Ceci vient du fait qu'en écrasant le VER dans une direction, l'ellipsoïde s'allonge dans la direction perpendiculaire. En tournant le VER à 90° (ou en changeant la direction

d’écrasement comme illustré en figure 3) la déformation s’applique selon la dimension la plus allongée de l’ellipsoïde, ce qui rend la refermeture plus délicate. De plus, on peut observer que la vitesse de refermeture est plus lente quand le retournement est effectué dans les derniers stades de refermeture.

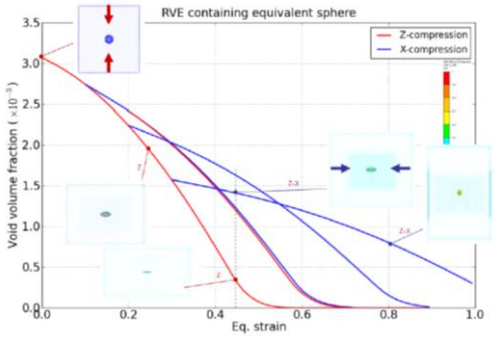

Figure 3 : Influence du changement de la direction de déformation sur l'évolution du volume d'un ellipsoïde.

Pour tenir compte de cette influence, le modèle *CicaPoro* doit tenir compte également de l’évolution de l’allongement et de l’orientation des ellipsoïdes au travers d’une définition tensorielle des pores.

4. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le consortium industriel CICAPORO composé de ArcelorMittal Industeel, Areva Creusot Forge, Ascometal CREAS, Aubert & Duval, Constellium et Timet pour le financement de ces travaux.

5. Références

[1] Lode, W.Versuche über den Einfluss der mittleren Hauptspannung auf das Fliessen der Mettalle Eisen, Kupfer und Nickel, Zeitschrift für Physik, vol. 11-12, pp. 913-939, 1926.

[2] Saby, M., Bernacki, M., Roux. E, Bouchard, P.-O., Three-dimensional analysis of real void closure at the meso-scale during hot metal forming processes, Computational Materials Science, 77, 194-201, 2013.

[3] Saby, M., Bouchard, P.-O., Bernacki, M., Void closure criteria for hot metal forming: a review. Journal of Manifacturing Process. 2014.

[4]Saby, M., Bernacki, M., Bouchard, P.-O., A geometry dependant model for void closure in hot metal forming process. *Submitted for publication* in International Journal of Solids and structures. 2014

[5] Saby, M., Bernacki, M., Bouchard, P.-O., Understanding and Modeling of Void Closure Mechanisms in Hot Metal Forming Processes: A Multiscale Approach, Procedia Engineering, 81, 137-142, 2014

[6] Zhang, X.X., Cui, Z.S., Chen, W., Li, Y.. A criterion for void closure in large ingots during hot metal forging. Journal of Materials Processing Technology 209(4), 1950 – 1959, 2009