

Comparaison de deux moyens de mesure sans contact pour un dispositif d'expansion équi-biaxiale à haute température

A. BOYER^{a,b}, H. LAURENT^a, M.C. OLIVEIRA^b

a. Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100, Lorient, France
adrien.boyer@univ-ubs.fr, herve.laurent@univ-ubs.fr

b. CEMMPRE, Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Polo II, Rua Luís Reis Santos, Pinhal de Marrocos, 3030-788 Coimbra, Portugal
marta.oliveira@dem.uc.pt

Résumé :

L'essai d'expansion équi-biaxiale (ou bulge test) permet d'identifier des modèles de comportement dans une gamme de déformation plastique plus vaste qu'un essai de traction classique. Afin de pouvoir obtenir la courbe contrainte - déformation du matériau, les mesures de la pression, du rayon de courbure et de l'épaisseur du dôme sont requises. La mesure par corrélation d'image permet une mesure de la déformation sur la surface complète du flan. Elle offre le moyen d'obtenir l'épaisseur et le rayon de courbure pendant la durée de l'essai. Cependant, lors de la mise au point d'un essai d'expansion à haute température sur un acier trempant 22MnB5, l'emploi de la mesure par corrélation d'image s'est avéré impossible. L'objectif de cette étude est de montrer que l'emploi d'un profilomètre laser est possible pour post-traiter cet essai à haute température.

Abstract :

The circular bulge test allows achieving relatively high strain values before necking and enables the definition of hardening law for a wide range of plastic deformation. The evaluation of the stress vs. strain curve requires recording the evolutions of pressure, radius of curvature and strain at the dome pole during the test. Digital Image Correlation (DIC) systems have been used to replace the more conventional mechanical systems since they enable the description of the geometry and strain distributions on the sheet surface during the bulge test. However, during the design of bulge test device at high temperature for 22MnB5 quenching steel, technical difficulties disabled the use of DIC for strain monitoring. The aim of this study is to show that the use of scanner laser is possible to analyse this test at high temperature.

Mots clefs : Aciers trempants, Emboutissage à chaud, Expansion Equibiaxiale, Courbe contrainte-déformation, Rayon de courbure

1 Introduction

L'emploi des aciers trempants et la mise en forme par emboutissage à chaud dans l'industrie automobile s'est largement développé depuis une dizaine d'années car ces méthodes permettent de réduire les poids des véhicules et donc les émissions polluantes [1]. L'essai d'expansion équibiaxial permet de décrire le comportement mécanique sur une plage de déformation plus grande que l'essai de traction uniaxial classique et apporte des informations complémentaires utiles pour l'identification de lois de comportement.

La caractérisation des matériaux, dans ces nouvelles conditions thermiques, impose de nouvelles contraintes expérimentales. En effet, l'emploi de méthode par corrélation d'images (ou Digital Image Correlation DIC), remplace les instruments de mesures conventionnels. Un motif stochastique est apposé sur le flan et doit résister aux hautes températures ainsi qu'aux grandes déformations subies lors de l'essai d'expansion. Ces travaux présentent une alternative à la corrélation d'image avec l'emploi d'un profilomètre laser. Le matériau choisi pour la comparaison entre ces deux moyens de mesure est l'alliage d'aluminium EN AW 6061-T6 à la température de 150°C. Largement utilisé dans l'industrie des transports pour des pièces structurelles ou extérieures, il combine propriétés mécaniques, bonne formabilité et résistance à la corrosion.

Les travaux ont été effectués sur le dispositif d'expansion à haute température avec chauffage par effet Joule mis au point au cours du projet ANR PRICECAT [2].

2 Procédure expérimentale

Un flan circulaire de diamètre 240mm et d'épaisseur 1mm est serré entre un serre-flan et une matrice (figure 1a)), les outils sont isolés électriquement par un revêtement PVD. L'étanchéité est assurée par un joint en céramique. Le flan est chauffé par effet Joule. Trois paires d'électrodes sont utilisées avec un courant pouvant atteindre jusqu'à 6000A. Chaque paire est activée de façon rotative comme présentée sur la figure 1b). Le dispositif permet un chauffage rapide et uniforme de la zone utile du flan avec un maintien de la température lors de la phase d'expansion. L'essai est organisé en trois phases distinctes : la première est une phase de chauffage rapide à la température d'essai ; cette phase est suivie d'une phase d'homogénéisation durant laquelle la température d'essai est maintenue constante ; enfin, la phase d'expansion est réalisée par la mise sous pression de la zone utile du flan par un gaz neutre, de l'argon. La mesure et le suivi de température sont effectués par un thermocouple de type K soudé au centre du flan par décharge capacitive.

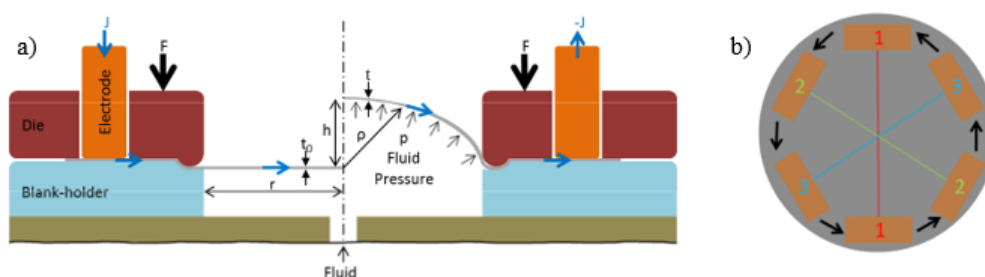


FIGURE 1 – Dispositif d'expansion utilisé : a) Principe du dispositif équibiaxial avec chauffage par effet Joule, b) Activation rotatives des trois paires d'électrodes

Les outils du dispositif sont montés dans une machine de traction Instron 8803 avec une cellule de force de 500kN. Le diamètre intérieur de la matrice est de 120mm, le rayon de congé de la matrice est de 5mm,

conformément aux recommandations de la norme ISO16808 [3]. La mesure du champs de déformation est assurée par le système DIC GOM Aramis 4M ou un profilomètre laser KEYENCE LJ-V7200.

3 Dépouillement de l'essai

Contrairement aux travaux de Bleck et Blumbach [4], il n'est pas possible d'effectuer un essai avec les deux moyens de mesures simultanément. Deux essais successifs sont donc réalisés. Contrairement à un système DIC qui donne les déformations sur toute la surface en expansion, le profilomètre mesure une ligne alignée sur la direction de laminage passant par le centre du flan. La figure 2 donne les principales grandeurs utilisées pour faire le post-traitement et en déduire la courbe contrainte-déformation de cet essai d'expansion.

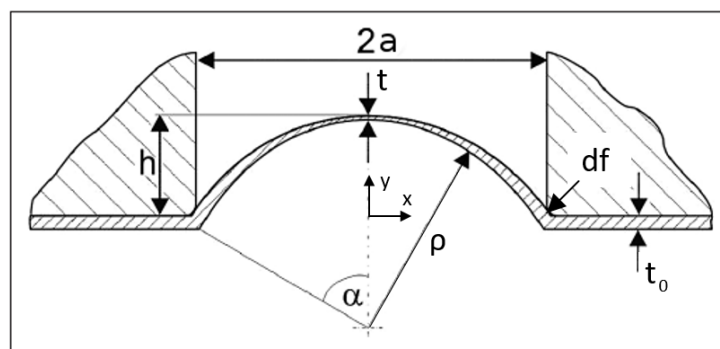


FIGURE 2 – Schéma de dépouillement du bulge test, les dimensions utilisées dans ces travaux sont : $a=60\text{mm}$; $df=5\text{mm}$; $t_0=1\text{mm}$

La théorie classique de Membrane lie la contrainte à l'épaisseur et au rayon de courbure du flan au pôle par l'équation suivante :

$$\sigma_{\text{membrane}} = \frac{P\rho}{2t} \quad (1)$$

avec P la pression dans la cavité, ρ le rayon de courbure du flan et t l'épaisseur du flan.

Plusieurs formulations existent dans la littérature pour estimer l'épaisseur du flan au pôle, avec la prise en compte des dimensions des outils, des propriétés du matériau ou de l'épaisseur finale [5, 6, 7]. La comparaison des résultats avec le système DIC a montré que la formulation de Hill [8] donne de meilleurs résultats sur l'EN AW 6061-T6 en respectant la formule de l'épaisseur suivante :

$$t = t_0 \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2} \right)^2 \quad (2)$$

avec t_0 l'épaisseur initiale du flan, h la hauteur du pôle et a le rayon de la matrice.

La déformation suivant l'épaisseur du pôle du flan est alors déduite de l'épaisseur par :

$$\varepsilon_t = \log \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (3)$$

on en déduit la déformation vraie, $\varepsilon = -\varepsilon_t$, en effectuant l'hypothèse d'un état de déformation équi-biaxial au pôle. La mesure de l'épaisseur au pôle par système DIC est par contre calculée en utilisant les

déformations principales moyennes dans une zone de 15mm autour du pôle en appliquant l'hypothèse d'incompressibilité des déformations plastiques suivante : $\varepsilon_t = -(\varepsilon_{majeure} + \varepsilon_{mineure})$.

Le rayon de courbure du flan dans la zone polaire du flan peut-être estimé par plusieurs formules de la littérature basées sur le déplacement vertical du pôle. Hill [8] fait l'hypothèse que le flan a une forme sphérique lors du formage dans les outils. Panknin [9] fait l'hypothèse de la forme sphérique dans les outils et prends en compte le rayon de congé de la matrice df dans l'estimation du rayon de courbure :

$$\rho_{panknin} = \frac{(a + df)^2}{2} + \frac{h}{2} - df \quad (4)$$

Gutscher et al. [10] ont montré que le rayon de courbure estimé par Panknin donnait de bonnes correspondances avec des résultats expérimentaux pour des hauteurs de dôme normalisées par le diamètre de cavité jusqu'à $h/a = 0.56$. Un déplacement maximal de 18.7mm avec l'alliage EN AW 6061-T6 à 150°C a été enregistré lors de ces travaux, correspondant à un rapport h/a de 0.3.

L'utilisation du système DIC autorise la mesure d'une surface. Le rayon de courbure est alors calculé avec cette méthode par l'ajustement d'une sphère à l'aide de la méthode des moindres carrés.

4 Résultats

Les essais sont menés à 150°C sur l'aluminium EN AW 6061-T6 jusqu'à une pression $P_{max} = 85\%P_{rupture}$ afin de ne pas endommager le dispositif. La figure 3 donne les résultats contraintes-déformations obtenus avec les deux méthodes de mesure (DIC et Scanner Laser). Ces résultats sont comparés avec la courbe en traction obtenue sur le même matériau et à la même température par Simoes et al. [11]. La courbe de traction est donnée jusqu'à la force maximale.

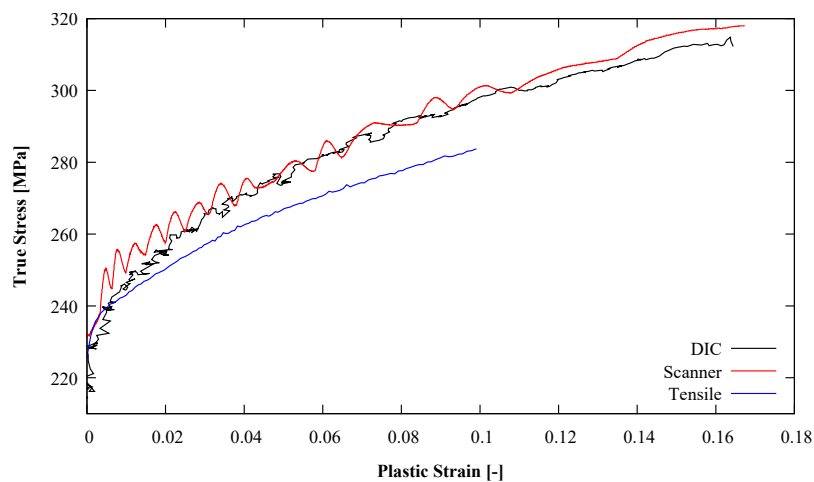


FIGURE 3 – Courbes contrainte de Cauchy vs Déformation plastique pour un essai d'expansion équibiaxiale à 150°C sur l'EN AW 6016-T6 ($\dot{\varepsilon} = 4 \times 10^{-3} s^{-1}$) obtenues par DIC et scanner laser. Comparaison avec des résultats de traction issus de [11] pour une vitesse de déformation initiale de $\dot{\varepsilon} = 2 \times 10^{-3} s^{-1}$

Les résultats obtenus en expansion sont reproductibles et identiques pour les deux systèmes de mesure avec les méthodes de post-traitement différentes. La comparaison des essais montrent une résistance

élastique similaire de 230 MPa entre les essais de traction et d'expansion équibiaxiale. Néanmoins, l'évolution de l'écroutissage est plus importante en expansion qu'en traction.

Les différences entre les essais de traction et d'expansion peuvent s'expliquer par deux raisons. La première provient de l'anisotropie du matériau qui entraîne que l'état de déformation biaxiale n'est pas complètement vérifiée au cours de l'essai d'expansion. La seconde est liée à la vitesse de déformation au cours des essais de traction et d'expansion qui n'évolue pas de façon identique entre les deux essais. Les oscillations observables sur les courbes contraintes-déformations des essais d'expansion peuvent s'expliquer par la mise en pression exercée sur le flan. Des oscillations sur la rampe de pression affectent en effet directement la hauteur du pôle du flan. Puisque le rayon de courbure et le calcul de l'épaisseur sont reliés à la hauteur du flan par les équations 2 et 4, les contraintes et les déformations sont alors directement affectées par ces oscillations.

5 Conclusion

Ces travaux confirment la possibilité de mener des essais d'expansion équibiaxiale en température avec un profilomètre laser en utilisant les formules de Hill et Panknin pour obtenir la courbe contrainte-déformation. En effet, les résultats sont identiques avec ceux obtenus par DIC issus des déformations mesurées sur la surface du dôme. Ces résultats montrent que l'utilisation du profilomètre est suffisant pour obtenir la courbe contrainte-déformation. Cette méthode sera utilisée prochainement pour effectuer le post-traitement des essais d'expansion à haute température (environ 1000°C) pour des aciers trempants type 22MnB5.

6 Remerciements

Ces travaux ont été financés par le Ministère français de l'Enseignement supérieur et la Recherche et de la Fondation Portugaise pour la Recherche et Technologie (FCT) via le projet "Materiais e Tecnologias Industriais Sustentáveis" (MATIS) CENTRO-01-0145-FEDER-000014.

Références

- [1] H. KARBASIAN et A.E. TEKKAYA : A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, août 2010.
- [2] H. LAURENT, A. BOYER, N. DEMAZEL, M. CARIN, P. LE MASSON, F. GLOCK et R. CANIVENC : Un dispositif d'essai d'expansion biaxiale à très hautes températures. *CFM, SI-Procédés de fabrication et mise en forme par grandes déformations*, 2017.
- [3] AFNOR : Matériaux métallique - Tôle et bandes - Détermination de la courbe contrainte-déformation biaxiale au moyen de l'essai de gonflement hydraulique avec systèmes de mesure optique, octobre 2014.
- [4] Wolfgang BLECK et Michael BLUMBACH : Laser-Aided Flow Curve Determination in Hydraulic Bulging. *steel research international*, 76(2-3):125–130, 2005.
- [5] A. A. KRUGLOV, F. U. ENIKEEV et R. Ya LUTFULLIN : Superplastic forming of a spherical shell out a welded envelope. *Materials Science and Engineering : A*, 323(1):416–426, 2002.
- [6] J. CHAKRABARTY et J. M. ALEXANDER : Hydrostatic bulging of circular diaphragms. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 5(3):155–161, 1970.

- [7] Lucian LĂZĂRESCU, Dan Sorin COMȘA et Dorel BANABIC : Analytical and Experimental Evaluation of the Stress-Strain Curves of Sheet Metals by Hydraulic Bulge Tests. *Key Engineering Materials*, 473:352–359, mars 2011.
- [8] Robert HILL : A theory of the plastic bulging of a metal diaphragm by lateral pressure. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(322):1133–1142, 1950.
- [9] W PANKNIN : *Der hydraulische Tiefungsversuch und die Ermittlung von Fließkurven (The hydraulic bulge test and the determination of the flow stress curves)*. Thèse de doctorat, University of Stuttgart, 1959.
- [10] Gerhard GUTSCHER, Hsien-Chih WU, Gracious NGAILE et Taylan ALTAN : Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(1):1–7, février 2004.
- [11] V.M. SIMÕES, Hervé LAURENT, Marta OLIVEIRA et Luís MENEZES : The influence of warm forming in natural aging and springback of Al-Mg-Si alloys. *International Journal of Material Forming*, 12(1):57–68, janvier 2019.