

## Etude bibliographique de la fissuration à chaud des alliages d'Aluminium moulés

A. HAMADELLAH\*, A. BOUAYAD\*

\*Laboratoire de Mécanique, Energétique et Matériaux, Université Moulay Ismail, Ecole Nationale supérieure d'Arts et Métiers, BP 4024, Meknès-Maroc  
*E-mail : hamadellah@hotmail.com*

**Résumé :** La coulée des alliages légers est un procédé utilisé en industrie pour la production de pièces moulées avec des propriétés mécaniques élevées. Malgré tous les efforts et recherches, la fonderie ne permet pas encore de couler des pièces exemptes de défauts. Un des problèmes récurrent de ce processus de fabrication est la formation des fissures à chaud dans la pièce coulée. Ce défaut survient lorsque le métal est dans l'état semi-solide. Dans ce travail, une étude de l'état de l'art de la fissuration à chaud des alliages d'Aluminium moulés est présentée. L'accent est mis sur les critères et les essais pour prédire et caractériser ce défaut.

### 1. INTRODUCTION

La rupture à chaud, ou crique à chaud (hot tear) est un défaut majeur en solidification. Elle conduit au rebut de nombreuses pièces dans différents procédés industriels tels que le moulage. La solidification en lingotière, la coulée continue des billets et brames et le soudage. Elle correspond à l'ouverture de criques au fond des régions à haute fraction de solide (au-delà de 90%) [1], lorsque celles-ci sont soumises à des déformations favorisant la mise en traction des films liquides résiduels. L'ouverture de ces criques donne lieu soit à des filets ségrégués, par appel de liquide fortement chargé en éléments d'alliage, soit à des fissures au sein du produit solidifié lorsque la pression interstitielle de liquide est insuffisante pour compenser leur ouverture [2].

Le phénomène est complexe car les origines de ces déformations sont multiples et le plus souvent combinées. En ce qui concerne les alliages d'aluminium, la fissuration à chaud résulte de diverses origines :

- Métallurgique : l'influence du type d'alliage s'exprime en premier lieu à travers sa composition chimique : de manière générale plus l'alliage a un intervalle de solidification important, plus il est sensible à la fissuration à chaud.
- Mécanique et géométrique : en coulée en moule tout particulièrement, la sollicitation mécanique du métal à l'état pâteux provient principalement des effets de retrait combinés à la résistance mécanique que le moule oppose à la pièce se solidifiant [3]. Certaines zones sont alors mises en tension alors même que leurs solidifications ne sont pas achevées.
- Thermique : en coulée continue, l'ensemble de la zone semi-solide est soumis à un état de contrainte et de déformation complexe lié à la solidification de la peau, et en particulier à l'intensité du refroidissement de cette dernière [4].

Ces effets se retrouvent aussi combinés dans le cas du soudage, où le cordon est soumis à des sollicitations thermomécaniques associées à des vitesses de refroidissement rapides et des gradients de température très sévères.

Ce travail présente une étude bibliographique sur les modèles de la fissuration à chaud ainsi que sur les principaux types d'essais expérimentaux utilisés pour déterminer la sensibilité des alliages d'aluminium aux criques.

## 2. LA FISSURATION A CHAUD

Du point de vue thermodynamique, la solidification est la transformation de l'état liquide à l'état solide. La structure du matériau résulte des gradients de température agissant à l'échelle du produit, et des transferts de solutés au niveau de l'interface liquide solide. Ce changement d'état se fait de façon continue, et la zone où coexiste la phase solide et la phase liquide est appelée 'zone pâteuse' ; le domaine de température délimitant le début et la fin de la solidification est appelé 'intervalle de solidification'. Ce domaine semi-solide peut être décomposé en différents stades comme l'a expliqué Eskin [5].

Certains alliages d'aluminium coulés en semi-continu, tels que le AA5182, AA6111 et AA2014, sont reconnus pour leur grande susceptibilité à la fissuration à chaud. Ils ne solidifient pas à température constante, comme un métal pur, mais plutôt sur un intervalle de température, appelé intervalle de solidification. Durant cet intervalle, quatre étapes de la solidification peuvent être observées (figure 1).

1. Lorsque la température de l'alliage descend en bas du liquidus, des particules solides commencent à se former. Ces dernières peuvent se mouvoir librement dans le métal liquide. Il y a possibilité de réaménagement des grains afin d'accommoder les contraintes qui se développent dans le lingot.

2. Ces particules solides en croissant finissent par se connecter entre elles pour former un réseau agissant comme squelette solide. Le métal liquide peut se propager à travers les dendrites facilement, ce qui constitue un autre mécanisme d'accommodement des contraintes. La perméabilité du réseau est élevée.

3. Le squelette devient plus dense et sa perméabilité a beaucoup diminué. Le métal liquide a de la difficulté à traverser le réseau dendritique. Il est emprisonné sous forme de film liquide entre les grains. Le réseau solide peut se rompre sous la contrainte. Cette fracture peut alors se propager dans le liquide intergranulaire s'il n'y a pas un apport de métal liquide pour la combler, formant ainsi une fissuration à chaud.

4. La fraction solide est très élevée. La résistance du réseau dendritique est très grande et le métal liquide se retrouve sous forme de film interdendritique. Le phénomène de fluage domine à ce moment.

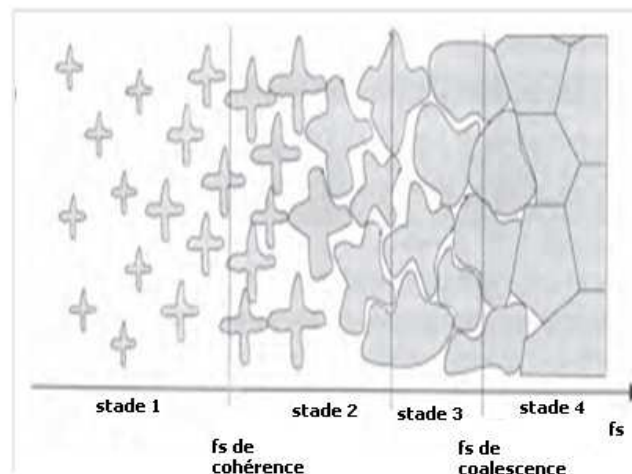


Figure 1 : les étapes constituant le processus de solidification [6]

La fissuration à chaud a tendance à se produire durant la troisième étape de la solidification et sa propagation se fait de manière intergranulaire. C'est dans l'état semi-solide à haute fraction solide ( $f_s > 0,9$ ) qu'il se produit.

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le développement de ce défaut durant la solidification. Elles peuvent être classées selon la variable qu'elles utilisent pour prédire la formation de la fissuration à chaud : déformation, taux de déformation, intervalle de solidification et contrainte. De chacune de ces théories, les

auteurs ont émis un critère de fissuration à chaud, leur but étant de pouvoir prédire l'existence ou non de ce défaut dans la pièce à couler. Ces critères ont été implantés dans des simulations de la coulée en semi-continue pour étudier leur pouvoir de prédiction.

Par ailleurs, afin de quantifier expérimentalement ce défaut de crique, plusieurs essais pratiques ont été menés en cours de solidification, essai de l'anneau, essai de doigt froid, essai d'os de chien, et essai avec mesure instantanée.

## 2.1. Critère de rupture à chaud

Les critères s'appuient sur diverses considérations (comme le manque d'alimentation en liquide, la formation de cavité due à une perte de pression métallostatique locale ou le temps de solidification), mais en aucune manière sur les propriétés mécaniques du matériau.

### 2.1.1. Critère de Clyne et Davies [7]

Ce critère est probablement le plus simple puisqu'il se base sur la comparaison entre deux temps définis à partir de fractions de solide données (0.4, 0.9 et 0.99). En conséquence, il s'agit là d'un critère purement thermique prenant juste en compte l'intervalle de solidification de l'alliage ainsi que les évolutions thermiques locales (Figure 2). La susceptibilité est définie par le coefficient HCS (Hot Cracking Sensitivity) :

Coefficient de sensibilité :

$$HCS = \frac{t_v}{t_R} = \frac{t_{99} - t_{90}}{t_{90} - t_{40}}$$

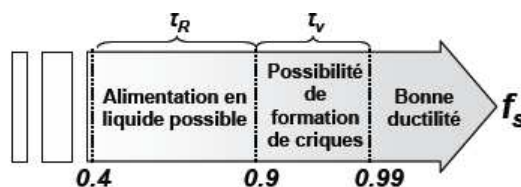


Figure 2 : Critère de susceptibilité basé sur la thermique.

### 2.1.2. Critère de R.D.G [8]

Ce modèle propose de prendre en compte la déformation en tension du squelette solide perpendiculairement à la direction de croissance dendritique ainsi que l'alimentation en liquide induite dans l'espace interdendritique (Figure 3). Il se base sur un bilan de masse entre les phases liquide et solide (description bi-phasique) mais ne prend pas en compte le comportement mécanique du solide en tant que tel (résistance mécanique, rhéologie).

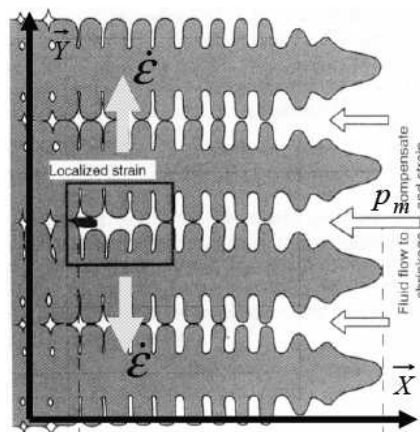


Figure 3 : Schéma de formation d'une fissure entre des dendrites colonnaires.

## 2.2. Caractérisation de la rupture à chaud

Dans la perspective de l'évaluation des critères présentés dans le paragraphe précédent, on cherchera à caractériser le comportement du matériau à l'état semi-solide. Ce paragraphe présente les essais en cours de solidification (pour lesquels on part d'un alliage à l'état liquide).

### 2.2.1. Essais en cours de solidification

La géométrie du moule a une incidence notable sur les sollicitations auxquelles la pièce va être exposée. Si le moule gêne le retrait du matériau au cours de sa solidification, des défauts vont pouvoir être engendrés.

Pour quantifier et caractériser le comportement de la force de déformation des alliages d'aluminium Shimin li et al [9] ont utilisé un moule avec une tige ancrée fixe et une autre reliée à un extensomètre qui enregistre les déplacements et les charges en fonction du temps pendant la solidification, et à des thermocouples pour décrire la température en fonction du temps (figure 4).

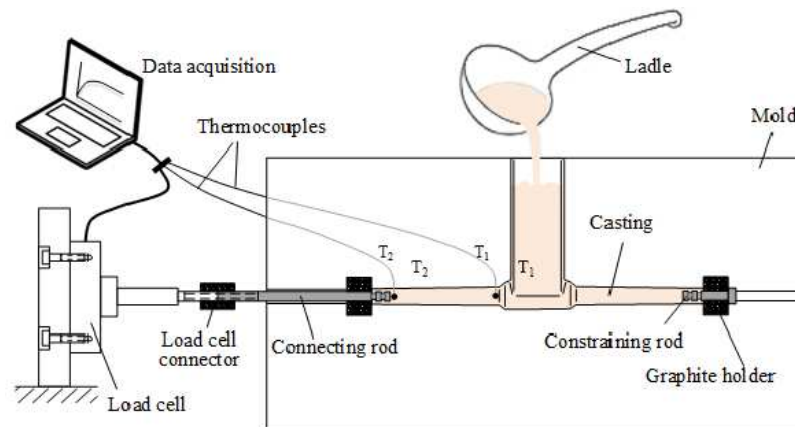


Figure 4 : Moule pour une éprouvette en forme de T

A partir des courbes réelles, charges et températures en fonction du temps et leurs dérivées on peut déterminer le début de la crique de différents alliages.

## 3. CONCLUSION

Dans ce travail, les principaux modèles et critères concernant le phénomène complexe de la déchirure à chaud ont brièvement été revus. Les connaissances sur les facteurs et les paramètres liés à la formation de la déchirure à chaud ont été développées progressivement au cours des décennies. La compréhension, la caractérisation et la prévision de la déchirure à chaud ainsi que le développement de modèles et la détermination de critères régissant ce phénomène ont été les aspects généraux de ces travaux. Les études se poursuivant dans ce domaine contribuent constamment à élargir la compréhension des chercheurs et à mieux saisir le phénomène. Cependant, jusqu'à aujourd'hui, aucun des modèles et des critères élaborés n'a été en mesure d'apporter une solution définitive pour résoudre le problème de la déchirure à chaud chez les alliages d'aluminium. En ce qui concerne le rôle joué par chacun des facteurs dans la formation de la déchirure à chaud, il semble bien que beaucoup de recherches soient encore nécessaires. L'objectif principal de ce présent travail n'est certainement pas de vouloir clore le débat et de fournir une solution complète au problème.

## REFERENCES

- [1] U. K. Bhattacharya, C. M. Adams, H. F. Taylor, "Hot Tear Formation in Steel Casting", Trans. AFS, 60, 1952, 675.
- [2] J. Campbell, "Casting", Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991.
- [3] A. K. Dahle, L. Arnberg, "Development of strength in solidifying aluminium alloys", Acta Materialia, 45, (2), 1997, pp. 547-559.
- [4] I. I. Novikov, "Hot Shortness of Nonferrous Metals and Alloys ", (English Translation of Goryachelomkost tsvetnykh metallov i splavov), 1968.

Aluminium Alloys, Progress in Materials Science, 2004, vol.49, pp.629-711

[5]. D.G. Eskin, Suyitno et L. Katgerman, Mechanical Properties in the Semi-Solid State and Hot Tearing of

[6] A. K. Dahle, L. Arnberg, Overview: the rheological properties of solidifying aluminium foundry alloys, J. O. M., 1996, pp.34-37.

[7] T.W. Clyne, GJ. Davies, Comparison between experimental data and theoretical predictions relating to dependence of solidification cracking on composition, Solidification and casting of metals, Metals Society; 1979, pp. 275.

[8] M. Rappaz, JM. Drezet, M. Gremaud, A new hot-tearing criterion, Metall Mater Trans A, 1999, Vol.30A, pp.449-456.

[9] S. Li, D. Apelian, K. Sadayappan. Quantitative Investigation of Hot Tearing of Al-Cu Alloy (206) Cast in a Constrained Bar Permanent Mold, Materials Science Forum, Vols. 618-619 (2009): 57-62