

INFLUENCE DE L'ENERGIE DE FAUTE D'EMPILEMENT SUR LES LOIS DE COMPORTEMENT EN FLUAGE : CAS DE Cu et Cu - 4 Si

M. RETIMA*
et D.E. MEKKI**

RESUME

L'influence de l'énergie de faute d'empilement au cours du stade secondaire du fluage, est difficile à cerner, tant sur le plan expérimental que théorique. On sait, cependant, que cet effet est important ; en effet, une faible énergie de faute d'empilement semble provoquer une diminution non négligeable de la vitesse de fluage et conduire à une meilleure résistance à chaud.

Les multiples tentatives de compréhension de ce phénomène ont quasiment toutes pour point de départ des lois empiriques exprimant l'évolution de la vitesse de fluage

($\dot{\epsilon}$), en fonction de la température (T) et de la contrainte appliquée (σ).

Nous nous proposons dans ce travail, d'apprécier l'influence de l'énergie de faute d'empilement sur les lois de comportement en fluage du cuivre ($\gamma = 55 \text{ mJ/m}^2$) et du cuivre à 4% de silicium (25 mJ/m^2). Nous montrons également que les valeurs d'énergie intervenant dans les lois de comportement s'accordent bien avec les résultats de la bibliographie.

ABSTRACT

The influence of stacking fault energy during the secondary stage of the creep process is hard to grasp, both experimentally and theoretically. It is, however, well-known that such an effect is very important ; indeed, a weak stacking fault energy is likely to produce a noticeable decreasing in creep speed and lead to a better heat resistance.

The numerous attempts at grasping this complex phenomenon have in almost all cases been based on empirical laws which express the creep speed evolution as a function of temperature (T) and stacking fault energy (γ).

The purpose of our study is to assess the influence of stacking fault energy on Cu ($\gamma = 55 \text{ mJ/m}^2$) and Cu-4 Si ($\gamma = 25 \text{ mJ/m}^2$) high temperature creep. We try to show that the role of such an energy behaviour law is in accordance with the bibliography results.

Several hypotheses have been examined in an attempt to account for the weakness of creep speed values in low stacking fault energies, such as copper and its alloys. On the whole, data analysis proves that copper creep is not controlled by bulk or pipe diffusion but is the result of a thermally activated slip, probably due the cross-slip.

In the case of Cu-4 Si, the stacking fault energy represents half of that Cu, the cross-slip proves to be harder and the creep could be controlled both by diffusion and cross-slip.

1- INTRODUCTION

Il est aujourd'hui admis que l'énergie de faute d'empilement (γ) constitue un paramètre important dans la compréhension des mécanismes de déformation plastique des métaux et alliages [1]. Cependant, ses définitions, continuent à faire l'objet de nombreuses controverses [2], notamment l'analyse des résultats de fluage obtenus sur le cuivre a suggéré l'intervention probable d'au moins deux mécanismes en parallèle, l'un étant le mécanisme classique de la montée des dislocations, gouvernée par la diffusion, l'autre le glissement dévié [3]. Dans ce cas, les caractéristiques de fluage devraient être sensibles aux valeurs de l'énergie de faute d'empilement, déterminantes dans le glissement dévié.

Aucun travail expérimental systématique n'étant, à notre connaissance, disponible pour évaluer cette hypothèse sur l'alliage Cu - 4 Si, nous nous sommes proposés d'observer et d'interpréter les différences de comportement lors d'essais de fluage en compression isotherme, entre le cuivre pur polycristallin dont l'énergie de faute d'empilement est égale à 55 mJ/m² [4] et un alliage polycristallin monophasé de cuivre à 4% atomique de silicium, avec γ valant dans ce cas 25 mJ/m² [4].

Nous montrons que ces matériaux n'obéissent pas aux lois de fluage classiques (type puissance) et qu'un glissement thermiquement activé, probablement le glissement dévié, intervient dans le processus. Et nous montrons aussi que les points expérimentaux issus de la compilation de Mohamed et Langdon [6] sont en excellent accord avec la droite représentative de la loi.

2- METHODE EXPERIMENTALE

Le cuivre utilisé sous forme pur ou alliée (solution solide à 4 at.% Si ou Cu-4Si) titre 99,998%. Il est livré sous forme de barreaux de 8 mm de diamètre. Le silicium ajouté pour l'obtention de l'alliage est de pureté électronique. Cette alliage est obtenu par fusion en ampoule scellé sous vide; le lingot est mis en forme de barreau cylindrique de 8 mm de diamètre par fusion sous haute fréquence en creuset de graphite.

Les barreaux de Cu et Cu-4Si sont tronçonnés, tournés, polis chimiquement et recuits sous vide secondaire (10⁻⁴ Pa) pendant 4 heures à 850°C.

Les échantillons (diamètre = 8 mm, hauteur = 16 mm) sont flués à haute température (> 450°C) par compression sous contrainte constante, dans un vide secondaire dynamique à l'aide d'une machine de traction Instron modifiée. En permanence, un micro-ordinateur, après lecture de la longueur instantanée de l'échantillon, calcule la force à appliquer pour garder la contrainte constante et commande, par

l'intermédiaire de relais, le mouvement de la traverse en conséquence.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'étude du comportement en fluage à haute température a été menée sur dix échantillons polycristallins de cuivre pur et quatorze éprouvettes polycristallines de cuivre à 4% atomique de silicium. Le domaine d'investigation est défini par $0,5T_f < T < T_f$ et $3.10^{-5}\mu < \sigma < 10^{-3}\mu$:

Pour Cu : $T/T_f = 0.64 - 0.77$ et $\sigma/\mu = 3.10^{-4} - 4.7.10^{-4}$

Pour Cu-4Si : $T/T_f = 0.58 - 0.81$ et $\sigma/\mu = 3.2.10^{-4} - 1.2.10^{-4}$

Les résultats expérimentaux auquel nous avons aboutis ne peuvent pas être décrits par la loi puissance couramment admise, bien que les contraintes utilisées soient faibles. Une analyse bibliographique exhaustive a conduit à privilégier le modèle semi-empirique proposé par Poirier [5]; selon ce modèle la montée contrôlée par la diffusion en volume et le glissement dévié agissent en parallèle.

Ils s'expriment par la relation suivante :

$$\dot{\epsilon}_a = \dot{\epsilon}_0 \left[\frac{\sigma}{\mu} \right]^3 \exp \left[\frac{-Q_d}{RT} \right] + \dot{\epsilon}_{GD} \left[\frac{\sigma}{\mu} \right]^2 \exp \left[\frac{-Q_{GD}(\sigma, \gamma)}{RT} \right] \dots (1)$$

avec :

$\dot{\epsilon}_{st}$ = Vitesse de fluage stationnaire

σ = Contrainte appliquée

μ = Module de cisaillement

Q_d = Energie d'activation

Q_{GD} = Energie d'activation de glissement dévié

γ = Energie de faute d'empilement

L'énergie d'activation Q_{GD} dépend de σ et γ suivant la loi approchée suivante [5] :

$$Q_{GD} = \frac{\mu^2 b^4}{1859 \gamma} \left[\text{Log} \frac{2\sqrt{3}\mu b}{\gamma} \right]^{1/2} \cdot \left[1 - \frac{3b\sigma}{\gamma} \right] \dots (2)$$

où b est le vecteur de Burgers

Le tableau I caractérise les valeurs de l'énergie d'activation du glissement dévié, Q_{GD} , obtenues par ce modèle.

Tableau I : Valeurs de l'énergie d'activation

γ (mJ /m ²) σ (Kg /mm ²)	Cu 55	Cu-4 Si 25
1	34,4 Kcal /mol	64,5Kcal /mol
2	28,8 Kcal /mol	36,0 Kcal /mol
3	/	7,6 Kcal /mol

Par ailleurs, l'influence de l'énergie de faute d'empilement (γ_f) sur les lois de comportement en fluage, a été étudiée ; les valeurs expérimentales obtenues sur Cu et Cu - 4 Si s'accordent bien avec le modèle proposé par Mohamed et Langdon [6] ce dernier a été testé avec succès sur 25 alliages et métaux CFC, comme le montre la figure 1.

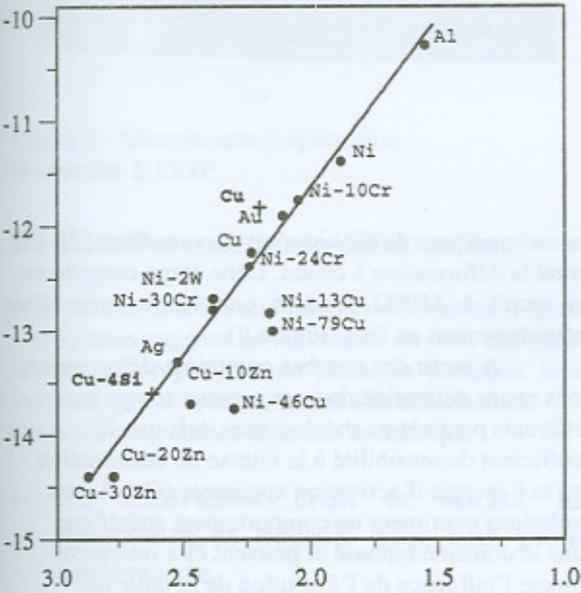


Figure.1. Relation entre la vitesse de fluage et l'énergie de faute d'empilement

Le tableau II : traduit les valeurs que nous avons obtenues, dans ce cadre, pour l'énergie de faute d'empilement dans Cu et Cu - 4 Si.

Tableau II : Valeurs de l'énergie de faute d'empilement

Matériaux	γ (mJ /m ²)	$\gamma / \mu b$	Log ($\gamma / \mu b$)	Log (ekT) / (D μb)
Cu	55	6.5 10 ⁻³	- 2.2	-12.3
Cu - 4 Si	25	2.5 10 ⁻³	- 2.6	-13.7

3-CONCLUSION.

L'ensemble de l'analyse des résultats montre d'abord que le fluage de Cu pur n'est pas contrôlé uniquement par la diffusion en volume ou le long des dislocations. Le glissement thermiquement activé, probablement le glissement dévié, semble intervenir de manière prépondérante, renforçant ainsi l'hypothèse de Poirier [6]. Dans Cu -4 Si, l'énergie de faute d'empilement est la moitié de celle de Cu et le glissement dévié y est plus difficile : le fluage pourrait être contrôlé à la fois par la diffusion et le glissement dévié. Dans les deux cas, Cu et Cu-4 Si, intervient un contrôle au moins partiel du fluage par le glissement thermiquement activé.

BIBLIOGRAPHIE

1. C.R. Barret, O.D. Sherby, Trans. Aime 223 (1965) 116
2. R. Raj, M.F. Ashby, Met. Trans (1971) 1113.
3. M.Retima, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VI (1985).
4. P.C.J. Gallagher, Met. Tran 1 (1972) 2429.
5. J.P. Poirier, Rev. Phys. Appl 11 (1976) 731
6. F. Mohamed, T.G. Langdon, Acta. Met 22 (1974) 779.

*Institut de métallurgie et génie des matériaux BP12, 23000- Annaba (Algérie).

**Institut de Physique - BP12, 23000- Annaba (Algérie).