

Etude du comportement statique et cyclique d'un alliage cuivreux Cu-Ni-Si à durcissement structural

B. SAADOUKI¹, M.ELGHORBA¹, M.RACHIK²

1. Laboratoire de contrôle et de caractérisation mécanique des matériaux et des structures (LCCMMS)

ENSEM, CASABLANCA, bouchra.saadouki@gmail.com

2. Unité de Recherche en Mécanique ROBERVAL - UMR CNRS 6253. Université de Technologie de Compiègne. France

Résumé

Le compromis conductivité électrique-caractéristiques mécaniques vient en premier lieu pour fixer les possibilités d'emploi des alliages cuivreux à durcissement structural. L'alliage Cu-Ni-Si en tant qu'alliage durcis par précipitation affiche des caractéristiques mécaniques élevées et une conductivité électrique modérée. Le travail présent s'étale sur deux parties, la première est une étude détaillée du comportement à la traction du cuivreux étudié, la deuxième s'intéresse à la réponse du matériau à la fatigue polycyclique.

Mots clés : *Cu-Ni-Si, fatigue, traction, courbe de Wöhler*

1. Introduction

L'innovation des matériaux véhiculant le courant électrique ne fait qu'augmenter. Le challenge est d'augmenter la conductivité électrique des alliages traditionnels et conserver ou améliorer le niveau de leurs propriétés mécaniques. Cette mission est assurée par les bronzes et les cuivreux à durcissement structural. Le durcissement structural par précipitation consiste à faire précipiter par des traitements thermiques de trempe et de revenu des particules de seconde phase dans les grains de l'alliage [1-3]. Ces précipités font obstacle au mouvement des dislocations dans les plans de glissement et améliorent ainsi la résistance mécanique [4].

Etant un matériau à apparition récente, l'alliage Cu-Ni-Si durcis par la précipitation de la phase Ni₂Si [5]. Il est utilisé dans des applications électroniques, électriques, et magnétiques.

Le passage cyclique du courant dans le matériau induit un chargement périodique et ainsi une rupture par fatigue.

L'objectif de ce travail est d'étendre les connaissances sur un alliage Cu-Ni-Si qui est peu étudié au point de vue comportement mécanique.

2. Matériel et méthode

2.1 Essais statiques de traction

Des essais de traction ont été réalisés sur le Cu-Ni-Si (96,9% Cu, 2,5% Ni et 0,6% Si) afin de déterminer les principales caractéristiques mécaniques. Ils ont été exécutés sur des éprouvettes plates prolongés de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. L'éprouvette ainsi fixée entre les deux mors de la machine de traction est soumise à un effort uniaxial. L'extensomètre est attaché entre les deux points de repérage définissant la partie utile de l'éprouvette L_0 (où l'état de contrainte est homogène). La géométrie de l'éprouvette utilisée est illustrée sur la figure.1.

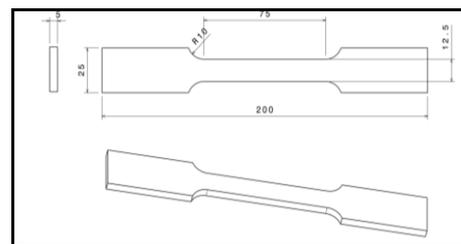


Figure 1 : Géométrie de l'éprouvette de traction

Le prélèvement des échantillons a été fait selon deux directions et avec deux épaisseurs différentes, la direction du laminage (sens long) et la direction transverse (sens perpendiculaire). Pour l'épaisseur de 5 mm, les éprouvettes ont été usinées alors que pour l'épaisseur de 35 mm, un bloc a été usiné et la mise à l'épaisseur (~5 mm) est effectuée par découpe au fil.

La combinaison entre le sens de découpage des éprouvettes et l'épaisseur mène à 4 séries d'essais, pour chaque essai, un lot de 4 ou 5 éprouvettes a été préparé, la répétition des essais vise une bonne reproductibilité.

2.2 Essais de fatigue

Le cuivreux a été reçu sous forme de barreaux de dimensions 14*14*60 mm. Pour bien réaliser les essais de fatigue, nous avons choisi l'éprouvette de forme classique à section circulaire à grand nombre de cycles (selon la norme ASTM E466-07) (Figure.2.a). L'usinage, la finition, incluant mise à la cote finale et polissage de la surface ainsi que les essais ont été effectués tous par la

société CETIM Maroc. Les essais de fatigue sont été réalisés sur une machine hydraulique biaxiale MTS modèle 17 (Figure.2.b). Tous les essais ont été effectués à contrainte imposée à une température de 20°C. Les sollicitations sont ici pilotées en charge de façon cyclique uniaxiale, avec une forme d'onde sinusoïdale. La fréquence pour tous les essais de fatigue est de 80 Hz.

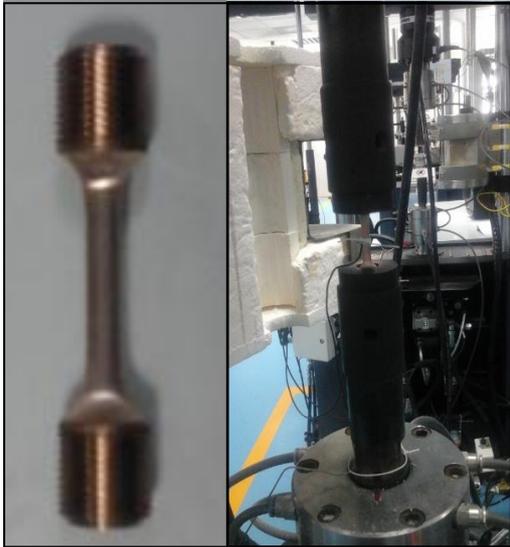


Figure 2 : Protocole expérimentale a) Echantillon de fatigue b) Essai de fatigue

3. Résultats et discussions

3.1 Comportement à la traction

Les conditions de reproductibilité des essais expérimentaux sont bien vérifiées malgré une faible dispersion constatée au niveau de l'allongement à la rupture. Cette reproductibilité des essais est un point fort pour la caractérisation précise de la loi de comportement de notre cuivreux (Figure.3)

L'examen de l'anisotropie (Figure.4) montre un décalage très léger entre la courbe de traction suivant le sens long et celle suivant le sens perpendiculaire pour des échantillons à 5 mm d'épaisseur. Cette différence s'estampe lorsqu'il s'agit de l'épaisseur de 35 mm. Le comportement en traction du Cu-Ni-Si est presque identique pour les deux sens de prélèvement.

L'échantillon le plus mince présente la résistance mécanique la plus bonne en traction uniaxiale. L'influence de l'épaisseur est notable (Figure.5). Lors de la sollicitation de traction, le cuivreux conserve la résistance mécanique supérieure pour la valeur faible de l'épaisseur. La différence est intéressante au niveau de la limite d'élasticité, elle diminue de 20% pour une épaisseur de 35 mm. Le domaine plastique n'est pas impacté par l'effet de l'épaisseur. Dans n'importe quelle direction, les observations des allongements à la rupture n'indiquent qu'une différence très sensible entre les deux

épaisseurs étudiées. Sur le tableau.1, nous avons porté les caractéristiques mécaniques optimales du l'alliage étudié.

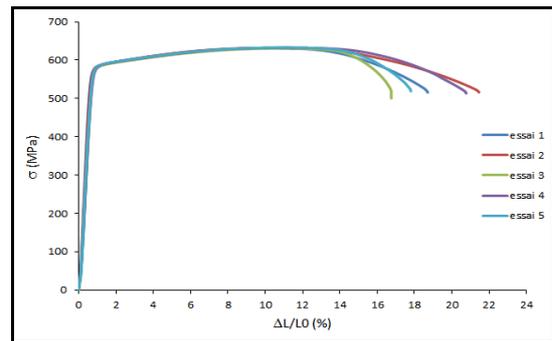


Figure 3 : Reproductibilité des essais de traction du Cu-Ni-Si

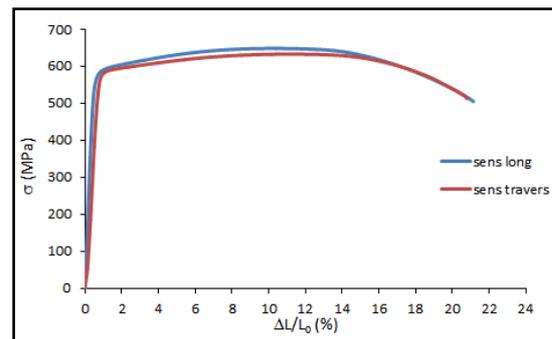


Figure 4 : Vérification de l'anisotropie du Cu-Ni-Si

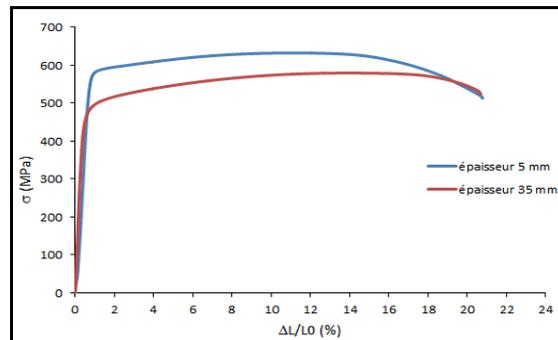


Figure 5 : Influence de l'épaisseur sur le comportement à la traction du Cu-Ni-Si

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques du Cu-Ni-Si

Module d'élasticité E(GPa)	Limite d'élasticité à 0.2 % $R_{e0.2\%}$ (MPa)	Résistance à la traction R_m (MPa)	Allongement à la rupture A%	Coefficient de poisson ν
123	567	646	21.14	0.35

Outre la résistance à la traction très remarquable de 646 MPa améliorée grâce au Silicium, le matériau possède un allongement à la rupture de 21 %, cette ductilité est due essentiellement à la haute température de la phase mise en solution-Trempe du traitement de durcissement. Le passage progressif, dans la courbe de traction, de l'élasticité linéaire à la déformation plastique, nécessite la définition de la limite d'élasticité conventionnelle

$R_{e0.2\%}$ qui est de l'ordre de 567 MPa. A partir de cette valeur de contrainte ($R_{e0.2\%}$) on apprécie un allongement permanent faible mais mesurable avec précision, le comportement cesse d'être élastique pour devenir plastique.

3.2 Comportement à la fatigue

✓ Modèle expérimental

Les résultats de la fatigue du Cu-Ni-Si présentent une dispersion importante. Cette dispersion des résultats d'essais de fatigue est aujourd'hui considérée comme un des aspects physiques de la fatigue [6]. La dispersion des résultats est liée à l'hétérogénéité des matériaux, aux défauts superficiels, aux tolérances d'usinage et surtout à des facteurs métallurgiques. Parmi ces facteurs, les inclusions sont les plus importantes. La dispersion est due en fait, à ce que l'action de la fatigue dans un métal est en général fortement localisée. Contrairement au cas des charges statiques, seul un petit volume de matériau est concerné. Le taux de fatigue dépend de la taille, de l'orientation et de la composition chimique de quelques grains de matériau qui sont situés dans une zone critique [7].

La méthode de l'intervalle de confiance est fréquente pour caractériser la tenue à la fatigue. On a choisis un intervalle de confiance à 80 % qui donnera un encadrement correct 80 fois sur 100 en moyenne, c'est-à-dire que si l'on pouvait répéter des essais de la même nature un grand nombre de fois, en affirmant à chaque fois que le N_R se trouve dans cet intervalle, on se tromperait en moyenne 20 fois sur cent. La figure 6 montre la courbe de Wöhler probabilisée à 80% de survie.

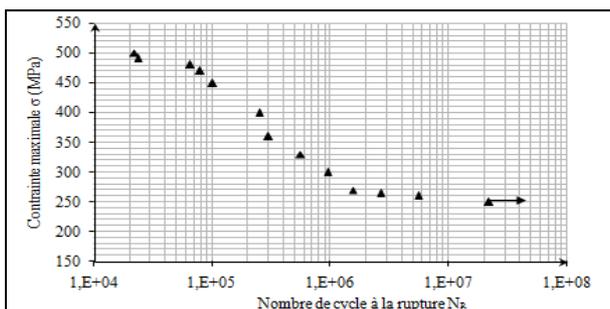


Figure 6: Courbe de Wöhler à 20 % de probabilité de rupture (80 % de survie) pour le Cu-Ni-Si

✓ Modèles analytiques

D'après la figure.7, l'équation de Stromeyer donne une représentation nettement plus réaliste que celles de Wöhler et de Basquin. Le modèle de Wöhler donne une bonne représentation de la partie moyenne de la courbe S-N, tandis que la partie supérieure (domaine oligocyclique) est bien estimée par l'équation de

Basquin. Le modèle de Stromeyer semble le plus proche à estimer la durée de vie du Cu-Ni-Si. Bien que nombreux modèles introduits sur des bases expérimentales existent, il n'y a pas à l'heure actuelle, un modèle mathématique bien ajusté à la courbe de fatigue sur ces différentes parties.

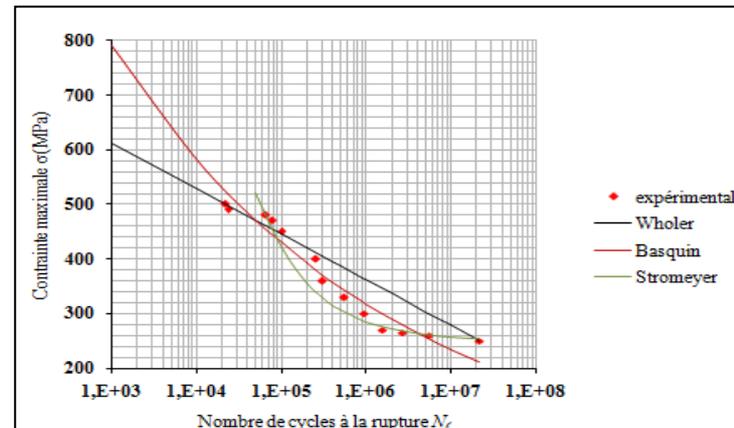


Figure 7: Comparaison entre courbe S-N expérimentale et courbes S-N analytiques avec différentes formules pour le Cu-Ni-Si

4. Conclusion

Dans cette étude, le comportement mécanique de l'alliage Cu-Ni-Si durcis par précipitation a été mis en évidence, plusieurs propriétés ont ainsi pu être dégagées :

- ✓ Peu n'importe le sens de prélèvement, le matériau prouve une bonne résistance mécanique.
- ✓ La diminution de la ductilité va avec la réduction de l'épaisseur, ceci est expliqué par la diminution du nombre de possibilité de déformation du matériau.
- ✓ Le modèle mathématique de Stromeyer semble le plus réaliste pour décrire le comportement cyclique.

REFERENCES

- [1] Lockyer S.A., Noble F.W. Fatigue of precipitate strengthened Cu-Ni-Si alloy. *Materials Science and Technology*, 1999, vol. 15, pp. 1147.
- [2] Batawi E., Morris D.G., Morris M.A. Effect of small alloying additions on behavior of rapidly solidified Cu-Cr alloys. *Materials Science and Technology*, 1990
- [3] Lee K.L., Whitehouse A.F., Withers P.J., Daymond M.R. Neutron diffraction study of the deformation behaviour of deformation processed copper-chromium composites. *Materials Science and Engineering A*, 2003
- [4] E.Hornborg, Hundred years of precipitation hardening, *Journal of Light Metals*, 1, (2001)
- [5] Fujiwara H., Sato T., Kamio A. Effect of alloy composition on precipitation behaviour in Cu-Ni-Si alloys. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 1998, vol. 62, pp. 301.
- [6] Lieurade H.P. (1991). *Rupture par fatigue des aciers*. Ed. Institut de Recherches de la Sidérurgie Française, collection IRSID-OTUA.
- [7] BRAND A, FLAVENOT JF, GREGOIRE R, TOURNIER C, « Recueil de données technologiques sur la fatigue », CETIM, 1980.