

ELABORATION ET CARACTERISATION MECANQUES ET METALLOGRAPHIQUES DES ALLIAGES BINAIRES CU-SN₁₀

BELHADJ Abd-Elmouneïm^{1,2*}, LAHOUZI Hichem¹ et SAHRAOUI Yahia¹

¹Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Yahia Fares de Médéa (26000), Médéa, ALGERIE

^{*,2}Laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux, USTHB, Bab-Ezzouar, (16111), Alger, ALGERIE
E-mail: belhadj_1@yahoo.fr/Tel: +213 7 71 26 61 29

RÉSUMÉ

Les alliages métalliques occupent un rôle important dans le développement industriel et leurs applications sont multiples. Cette étude est consacrée à l'élaboration des alliages binaires de cuivre-étain avec une teneur de 10% en masse d'étain par la méthode de fusion dans un four à remous sous atmosphère contrôlée. Des tests de tractions uniaxiales à température ambiante ont été réalisés dans le but d'étudier l'influence de l'addition d'étain dans la matrice des alliages de cuivre dans un premier temps. Dans un second temps, des caractérisations métallographiques et des mesures de duretés ont été réalisées afin de relier les caractéristiques morphologiques et mécaniques des phases constitutives. Finalement, une étude par analyse thermique différentielle " ATD " sur l'échantillon obtenu en refroidissement lent pour nous permettre de relier les phases à la trajectoire de solidification de cet alliage.

Mots-clés: *Alliage de cuivre, Processus d'élaboration, Résistance du matériau, Métallographie, ATD.*

1. Introduction :

Les matériaux en général prennent une place importante dans le domaine industriel, ils se déclinent sous diverses formes et les alliages métalliques occupent toujours une place sérieuse, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches. Les alliages à base de Cu-Sn appelés les bronzes, ont une bonne résistance à l'usure [1], conductivité électrique [2] et une bonne résistance à la corrosion [3]. Ils sont aussi employés dans divers domaines tels que les tuyauteries de distribution d'eau et de gaz, les échangeurs thermiques, et les centrales électriques conventionnelles et nucléaires. Il existe des théories reliant d'une façon simple comportement mécanique des bronzes et composition mais les propriétés mécaniques finales dépendent en grande partie du procédé d'élaboration à travers la microstructure du métal [1, 4, 5]. De ce fait, il est important d'étudier les relations entre microstructure et propriétés de l'alliage Cu-Sn₁₀. Pour mieux connaître ce type de matériaux nous avons décidé d'élaborer des alliages de Cu-Sn dont la teneur en étain est de 10% en masse par le procédé de fusion dans un four à remous sous atmosphère contrôlée et d'étudier le comportement mécanique des éprouvettes obtenues. Des essais de tractions uniaxiales sur plusieurs échantillons, nous ont permis de comparer les courbes contraintes/déformation et de montrer la reproductibilité des résultats obtenus. Ceci nous a amenés à interpréter les courbes des essais de tractions qui présentent trois domaines dont un "plateau" avec une contrainte caractéristique σ_p . Pour compléter la caractérisation macroscopique, une étude microscopique des échantillons Cu-Sn a été réalisée avec des

observations en microscopie optique et des mesures de microdureté des phases pour nous admettre de relier les caractéristiques morphologiques et mécaniques des phases constitutives. Finalement, pour doter cette recherche, une analyse thermique différentielle a été réalisée pour révéler les phases présentes dans nos alliages Cu-Sn obtenus au cours de la solidification lente et de les comparer avec les résultats obtenus dans la littérature.

2. Techniques expérimentales :

La réalisation de ce travail a nécessité l'utilisation de diverses techniques expérimentales complémentaires et propres à chaque étape.

2.1. Matériaux utilisés :

L'élaboration des alliages Cu-Sn a été effectuée par fusion des métaux purs cuivre et étain (99,9%) dans un four à remous sous atmosphère contrôlée. Les alliages élaborés sont ensuite tronçonnés à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, et usinés de façon à obtenir de petits lingots cylindriques de 9 mm de hauteur et de 6 mm de diamètre destinés à l'analyse thermique différentielle.

2.2. Analyse thermique différentielle :

Les lingotins sont étudiés par analyse thermique différentielle (ATD) à l'aide d'un appareil type [DTA-NETZSCH 404 S] sous flux d'argon. La vitesse de chauffage et refroidissement adoptée est de 1 K/min, cette vitesse étant jugée suffisamment lente pour que l'équilibre entre le liquide et le solide puisse s'établir. Les températures de transformations correspondant à la formation de la phase primaire sont pratiquement les mêmes à la montée et à la descente en température.

2.3. Etude morphologique et identification des phases :

Les échantillons d'A.T.D. sont ensuite enrobés dans de la résine (Epofix polymérisant à température ambiante en 12 heures), puis polis. Après le polissage de finition, l'échantillon peut être observé à l'aide d'un microscope métallographique [Zeiss Axiovert 450] dont le grossissement peut atteindre 1000x, pour contrôler l'état de surface, observer les inclusions non métalliques et les fissures éventuelles avec ou sans attaque chimique. Les phases ou les grains constituant l'échantillon réagissent différemment selon leur nature ou leur orientation à l'attaque chimique, ce qui produit des contrastes facilitant leur différenciation. Nous avons utilisé comme bain d'attaque du picrate de soude alcalin bouillant formé d'acide picrique cristallisé (20g), de soude en pastilles (250g) dans un litre d'eau distillée. La durée de l'attaque dure 8 à 10 minutes. A l'aide d'un appareil photo adapté au microscope, nous avons réalisé des prises de vue des microstructures observées.

2.4. Caractérisations mécaniques des échantillons :

Nous avons utilisé une machine de traction (MTS Adamel Lhomargy-DY36) sur laquelle ont été montés deux plateaux parallèles rigidement liés aux traverses fixe et mobile. L'allongement a été mesuré avec un capteur de déplacement linéaire LVDT (série SM12). Quelques échantillons ayant servi aux observations optiques sont également caractérisés par la mesure de la microdureté Vickers sous différentes charges afin de distinguer la dureté des phases qui constituent les alliages.

3. Résultats et discussions

3.1. Présentations des échantillons:

Les alliages Cu-Sn₁₀ obtenus sont d'abord observées macroscopiquement (figure 1).



Figure 1: Photos des échantillons Cu-Sn₁₀ obtenus par le four à remous.

3.2. Essais mécaniques de traction :

Des essais de traction sur des éprouvettes usinées d'après la norme de la machine universelle de traction dont la longueur $L_0 = 30\text{mm}$, diamètre $D = 6\text{mm}$ et le filetage est de M10. La figure 2 présente une photographie des échantillons qui ont servi aux essais de traction uniaxiale.



Figure 2: Photos des échantillons Cu-Sn₁₀ normalisées qui ont servi à l'essai de traction uniaxiale.

La figure 3 illustre l'allure de l'essai de traction de l'échantillon 1 de l'alliage Cu-Sn₁₀. Cette figure met en évidence trois domaines dont le premier correspond au domaine élastique ou réversible si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales. Le domaine linéaire, caractérisé par un module d'Young apparent E^* . Le deuxième domaine, le plateau de traction qui correspond à une déformation plastique homogène. Les allongements dans cette zone croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette. Le troisième domaine, la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est pas homogène, c'est la striction on aboutit à la rupture en point C, les allongements croissent avec diminution de la charge. La figure 4 présente la totalité des courbes contraintes-déformations de trois échantillons qui ont été élaboré par la même nuance.

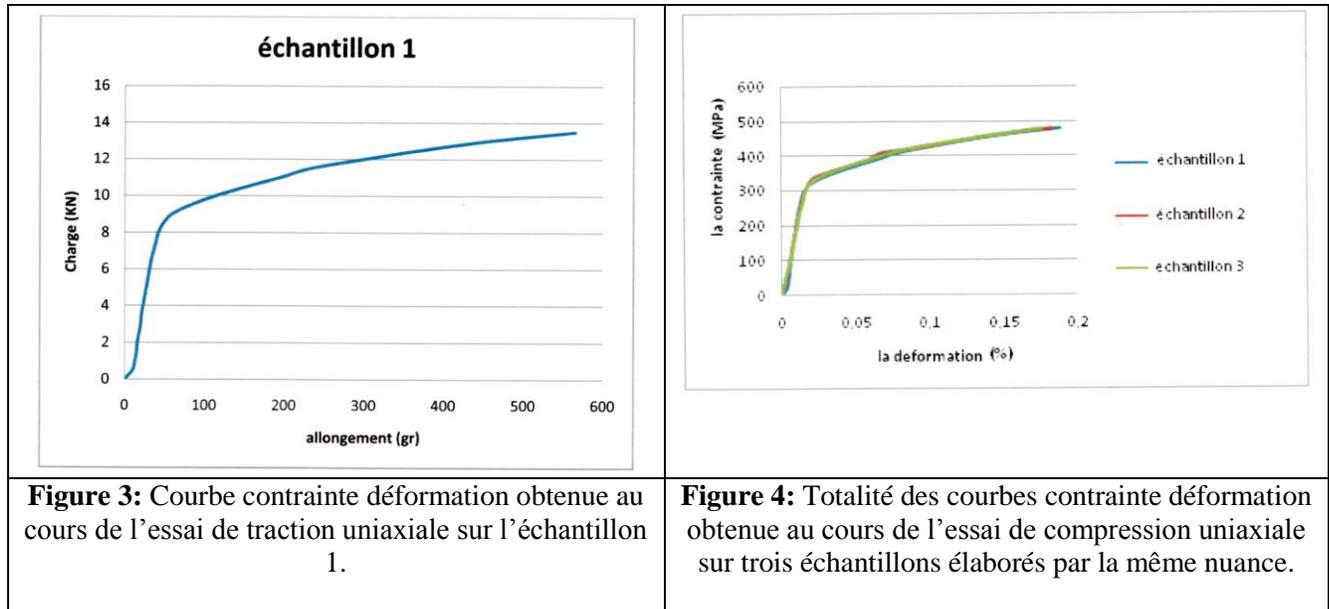


Figure 3: Courbe contrainte déformation obtenue au cours de l'essai de traction uniaxiale sur l'échantillon 1.

Figure 4: Totalité des courbes contrainte déformation obtenue au cours de l'essai de compression uniaxiale sur trois échantillons élaborés par la même nuance.

Ces résultats démontrent une bonne reproductibilité des essais mécaniques de traction réalisés. La mesure de la contrainte de plateau est relativement voisine d'un essai à l'autre pour les trois éprouvettes ayant la même composition. On peut aussi noter que le domaine élastique est similaire pour les trois essais réalisés.

L'analyse de la courbe contrainte-déformation a mis en évidence un caractère très ductile et une absence de pic pour signifier le début de plateau. La méthode de détermination de la contrainte de début de plateau σ_p est la même pour chaque courbe. σ_p correspond à l'ordonnée du point d'intersection des tangentes tracées dans la partie linéaire initiale et sur le plateau. Les valeurs de la limite d'élasticité R_e , de la limite d'élasticité conventionnelle $R_{e0,2}$, de la résistance à la traction R_m et celle du module d'Young apparent E^* ont été reportées dans le tableau 1.

Tableau 1: Les grandeurs obtenues par dépouillement des courbes contraintes- déformations au cours de l'essai de traction uniaxiales sur les éprouvettes types.

Echantillons	Contrainte de plateau σ_p (MPa)	Limite d'élasticité R_e (MPa)	Limite d'élasticité conventionnelle $R_{e0,2}$ (MPa)	Résistance à la traction R_m (MPa)	Module d'Young apparent E^* (GPa)
1	310	300	315	477,46	31,205
2	306	298	311	472,21	31,220
3	309	303	321	479,56	31,284

3.3. Etude microscopique:

La plupart des métaux couramment utilisés pour leurs propriétés métalliques sont en fait des alliages. Cela conduit à des situations où le matériau est en général polyphasé. Les phases présentes à une température donnée, et leurs proportions respectives peuvent être déduites du diagramme de phase et des densités des phases.

Les microstructures présentent deux contrastes dénotant l'existence de phases différentes (figures 5-6). La zone jaunâtre représente la phase riche en cuivre résultant de la transformation $Liq \leftrightarrow \alpha(Cu)$. La zone obscure représente la solution solide riche en étain produite par l'équilibre $\alpha(Cu) \leftrightarrow \epsilon(Sn)$.

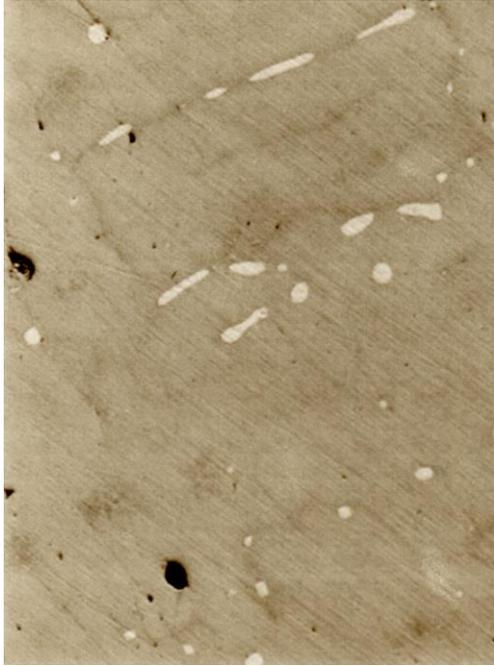


Figure 5: Observation micrographique de l'échantillon 1 sans attaque chimique (grossissement 300x)



Figure 6: Observation micrographique de l'échantillon 1 après l'attaque chimique (grossissement 300x)

Quelques échantillons ayant servi aux observations optiques sont également caractérisés par la mesure de la microdureté Vickers sous différentes charges afin de distinguer la dureté des phases.

Les empreintes sur les phases sont faites par l'influence d'une pointe en diamant de forme pyramidale. La charge prise pour mesurer la dureté des phases est de 0,5 gramme. Ce choix a été fait, au regard de la taille de nos phases qui est de l'ordre de 10 μm .

Les valeurs des duretés globalement sont très voisines ce qui explique probablement l'homogénéité aux précipitations à l'état solide d'étain dans le cuivre.

3.4. Etude par analyse thermique différentielle:

Les résultats d'A.T.D. pour les échantillons obtenus au cours d'un refroidissement lent ont été reliés à la trajectoire de solidification de l'alliage Cu-Sn₁₀. La figure 12 présente le thermogramme typique qui illustre les transformations de phases produites au cours de la solidification lente de cet alliage. Notons que le thermogramme obtenu comporte deux signaux exothermiques qui sont liés aux transformations suivantes :

- 1: 1100 ° C, la solidification stable, $\text{Liq} \rightleftharpoons \alpha(\text{Cu})$,
- 2: 823 ° C, la solidification stable, $\alpha(\text{Cu}) \rightleftharpoons \varepsilon(\text{Sn})$,

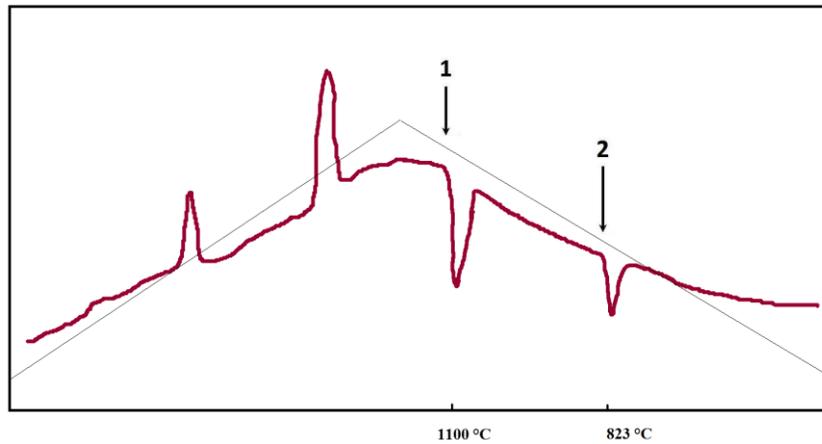


Figure 7 : Thermogramme obtenu en cours de refroidissement de l'alliage Cu-Sn (10% en poids de Sn). 1- Cuivre alpha ; 2- équilibre stable α/ϵ .

4. Conclusion :

Le présent travail nous a permis la maîtrise de la méthode d'élaboration de l'alliage Cu-Sn10 par le four à remous sous atmosphère contrôlée. Les alliages ont été caractérisés mécaniquement en traction uniaxiale afin de déterminer les propriétés mécaniques et la limite d'élasticité en traction. Une caractérisation de la microstructure avec l'analyse thermique différentielle ont été faites pour interpréter les transformations apparaissant à 1100°C et à 823°C et de les relier au diagramme de phase donnée dans la littérature. Enfin, les perspectives de ce travail consistent à modifier les cinétiques de chauffage, refroidissement et déduire l'effet de ces modifications sur les transformations de phases.

5. Références bibliographiques

- [1]: Rahul Gupta, Sanjay K. Panthi, Sanjay Srivastava, "Study of Microstructure, Mechanical Properties and Wear Rate of High Lead Tin Bronze after Multidirectional Forging", *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, (2015), pp. 1136-1142.
- [2]: David Simpson, Marc Van Meirvenne, Erika Lück, Jean Bourgeois, Jörg Rühlmann "Prospection of two circular Bronze Age ditches with multi-receiver electrical conductivity sensors (North Belgium)", *Journal of Archaeological Science*, vol. 37, (2010), pp. 2198-2206.
- [3]: Barbara Horváth, Tadashi Shinohara, Balázs Illés, "Corrosion properties of tin-copper alloy coatings in aspect of tin whisker growth", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 577, (2013), pp. 439-444.
- [4]: F. Keraghel, k. Loucif, M.P. Delplancke, "STUDY OF BRONZE POROUS ALLOY Cu-Sn WORKED OUT BY METALLUGY OF THE POWDERS", *Physics Procedia*, vol. 21, (2011), pp. 152-158.
- [5]: Michael Doyle, Kuldeep Agarwal, Winston Sealy and Kevin Schull, "Effect of Layer Thickness and Orientation on Mechanical Behavior of Binder Jet Stainless Steel 420 + Bronze Parts", *Procedia Manufacturing*, vol. 1, (2015), pp. 251-262.