

CALCUL DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT ET MICROSTRUCTURE DE L'ALLIAGE Al-5%Cu SOLIDIFIE RAPIDEMENT

Reçu le 07/02/2009 – Accepté le 17/10/2010

Résumé

La technique de trempe sur roue tournante a permis d'élaborer des rubans d'épaisseur moyenne de 30 μm pour une vitesse de rotation périphérique de la roue de 42m/s. La résolution de l'équation de Fourier pour un transfert de la chaleur dans les conditions de chute brutale de l'alliage fondue sur le substrat en rotation, nous a permis de déterminer le profil de la distribution de la température du ruban suivant son épaisseur. Le temps de solidification et la vitesse de refroidissement ont été aussi recherchés et sont estimés respectivement à 2.3×10^{-6} s et 4×10^7 °C/s. La microstructure des constituants de l'alliage Al-5%Cu s'est transformée, sous l'influence de la trempe rapide, en de fins précipités de l'eutectique $\alpha\text{-Al}/\theta$ dispersés dans la matrice $\alpha\text{-Al}$. La présence d'une nouvelle phase σ , précipitant sous forme de fines particules globulaires, a été aussi observée et confirmée par analyse structurale.

Mots clés : solidification rapide, vitesse de refroidissement, transfert de chaleur, phase σ .

Abstract

The melt-spinning technique has allowed to yield ribbons of 30 μm of width for a 42 m/s of while rotation rate. The Fourier equation resolution for a heat transfer in the brutal fall condition of melted alloy on the rotation substrate, one allowed to determine the temperature gradient profile of ribbon in it width. The solidification time and cooling rate was also investigated and was evaluated to respectively 2.3×10^{-6} s and 4×10^7 °C/s. The microstructure constituents of the Al-5%Cu alloy where transformed, under the rapidly quenching, in the fine precipitate of $\alpha\text{-Al}/\theta$ eutectic which dispersed in the $\alpha\text{-Al}$ matrix. The presence of a new σ phase which precipitated in the spherical fine particles was also observed and confirmed by structural analysis.

Keywords : rapid solidification, cooling rate, heat transfer, σ phase.

C.SERRAR

N.BOUMAIZA

A.BOUBERTAKH

N.BOUKHEIT

Laboratoire de Thermodynamique et
Traitement de Surface des Matériaux
Faculté des Sciences Exactes
Département de Physique
Université Mentouri Constantine
Algérie.

ملخص

30 μm

.42m/s

. 4×10^7 °C/s 2.3×10^{-6} s

$\alpha\text{-Al}/\theta$

σ

Al-5%Cu

. $\alpha\text{-Al}$

. σ

: _____

I

NTRODUCTION

Le procédé de la solidification rapide (SR) ouvre de nouveaux horizons pour le développement des alliages. Les produits commerciaux peuvent avoir de nouvelles compositions qui peuvent conduire à des structures inhabituelles et des propriétés excellentes. En général, la solidification par trempe rapide du liquide peut conduire à des solutions solides sursaturées, à des phases métastables et même amorphes, à augmenter l'homogénéité chimique et les limites de solubilité de l'alliage, à une diminution de la taille des grains et à produire de nouvelles structures microcristallines. L'amélioration de certaines propriétés de l'alliage est le résultat d'une ou plusieurs de ces transformations.

Pour les alliages d'aluminium, la SR peut souvent conduire à l'amélioration de leurs propriétés mécaniques ou thermiques [1]. Leur production par la méthode de trempe sur roue tournante (melt-spinning) et la plus couramment utilisée car elle est moins coûteuse et génère des vitesses de refroidissement contrôlables et très élevées. C'est donc la technologie la plus prometteuse pour une nouvelle génération de matériau. La solidification au niveau de l'interface solide/liquide dépend de la vitesse de refroidissement qui tend à augmenter la surfusion et limiter les phénomènes de diffusion atomique et peut alors conduire à une croissance hors d'équilibre.

S.C.Gill et al. [2] établissent par exemple une carte de la microstructure des alliages Al-Cu en fonction de la vitesse de solidification et de la teneur en cuivre d'une goutte liquide fondue par jet laser. Y.Wang et al. [3] montrent, dans les alliages AlSb, que l'augmentation de la vitesse de trempe modifie la microstructure par suppression de l'eutectique α -Al/AlSb intercellulaire et de la phase intracellulaire AlSb.

Il est donc intéressant d'avoir un ordre de grandeur de la vitesse de refroidissement après solidification du matériau hyper trempé par la méthode de melt-spinning pour mieux comprendre l'état microstructural d'un alliage SR. Deux principales méthodes de calcul sont utilisées dans la littérature pour calculer la vitesse de refroidissement du liquide; la première, à partir de la géométrie de croissance cristalline microstructurale [4-5] et la deuxième méthode à partir du flux thermique dissipé en cours de refroidissement [6-9]. Pour ce dernier cas, les différents auteurs donnent une vitesse de refroidissement de l'ordre de 10^6 °C/s pour les alliages AlMg et AlSi solidifiés par trempe sur roue et dont l'épaisseur des rubans varie entre 40 et 50 μ m.

Le but de ce travail est, en s'appuyant sur les principes de cette dernière méthode, d'appliquer la loi de Fourier pour le transfert thermique entre le liquide et la roue de refroidissement (en cuivre) et ensuite de rechercher une solution appropriée des équations différentielles associées aux phénomènes de transfert thermique permettant ainsi de calculer le temps et la vitesse de refroidissement d'un alliage Al-5%Cu, solidifié par la méthode du melt-spinning et obtenu en forme de ruban. Les conditions thermiques et techniques d'élaboration sont

précisées et les microstructures associées sont aussi examinées.

2. METHODE EXPERIMENTALE

L'alliage Al-5% pds Cu a été préparé en utilisant les éléments Al et Cu de pureté respective 99,45 et 99,98%. La fusion de l'alliage a été réalisée dans un creuset en alumine, sous la protection du bain chimique KCl+MgCl (38%), en utilisant un four électrique et ensuite refroidi à l'air. Après être homogénéisé à 350°C pendant 24 heures, le lingot obtenu est coupé en morceaux d'environ 3x5 mm puis fusionné à nouveau dans un tube à quartz sous atmosphère contrôlée d'argon en utilisant un four électrique monté verticalement. Le liquide est ensuite éjecté sur une roue en cuivre de diamètre 0.20 m tournant à une vitesse circonférentielle de 42 m/s. Le diamètre de la buse du tube à quartz est d'environ 2 mm et la distance buse-roue est comprise entre 2 et 4 mm. La surface de la roue en cuivre a été polie jusqu'au grain 600 puis nettoyé à l'acétone. La pression d'éjection de l'argon est d'environ 0.6 bar. Les rubans de l'alliage ainsi élaboré (figure 1) ont une longueur de 2 à 10 cm, une largeur de 2 à 5 mm et une épaisseur moyenne de 30 μ m.

Le réactif de Keller a été utilisé pour l'attaque chimique des rubans. Les caractérisations morphologiques et microstructurales, des rubans élaborés, ont été réalisées en utilisant le microscope électronique à balayage.

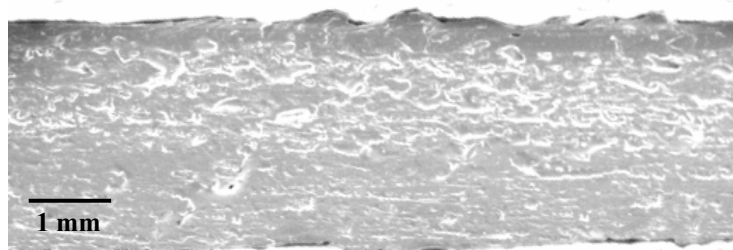


Figure 1. Image en MEB d'un ruban Al-5%Cu (face côté roue), solidifié rapidement par la technique de trempe sur roue, à la vitesse de refroidissement de 4×10^7 °C/s.

3. HYPOTHESE DE MODELISATION ET VITESSE DE REFROIDISSEMENT

3.1. Hypothèses de modélisation et solution

Le liquide porté à 800 °C, est soumis à l'instant initial à une rupture de son équilibre thermique et échange donc de la chaleur avec la roue en cuivre. Ceci implique qu'il existe nécessairement un gradient de température à l'intérieur des deux corps respectifs: liquide solidifié et roue. Le problème

concerne alors un système thermique épais où la température n'est fonction que du point considéré (x) et du temps (t); la conduction thermique est supposée alors monodimensionnelle, en raison de l'homogénéité chimique et thermique suivant la largeur et la longueur des rubans solidifiés. Le contact thermique entre la roue et le liquide solidifié est supposé parfait. La conductivité thermique dans le ruban et dans la roue en cuivre est régie par la loi de Fourier.

Le problème est monodimensionnel et l'équation de la chaleur, dans le cas où l'énergie produite au sein même du matériau est nulle, se réduit à [10]:

$$\partial T / \partial t = \alpha \partial^2 T / \partial x^2 \quad (1)$$

Où α est la diffusivité thermique du matériau (m^2/s).

En régime variable, l'équation (1) admet théoriquement une infinité de solutions. On peut résoudre le problème en appliquant la transformation de Laplace à l'équation (1):

$$\int_0^{\infty} e^{-pt} (\partial^2 T / \partial x^2) dt - (1/\alpha) \int_0^{\infty} e^{-pt} (\partial T / \partial t) dt = 0 \quad (2)$$

Où p est un nombre réel ou complexe.

Soit $\bar{T}(x, p)$ la transformée de $T(x, p)$, par définition:

$$\bar{T}(x, p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} T(x, t) dt \quad (3)$$

En utilisant les propriétés de la transformée de Laplace, on peut ramener l'équation (2) aux dérivées partielles simplement différentielle, plus facile à résoudre.

L'équation transformée (2) s'écrit alors:

$$d^2 (T(x, p) - T_0) / dx^2 - (p/\alpha) (\bar{T}(x, p) - T_0) = 0 \quad (4)$$

Où $T_0 = T(x, 0)$.

La solution générale de (4) est [11]:

$$\bar{T}(x, p) - T_0 = A \exp(-kx) + B \exp(kx) \quad (5)$$

Où $k = p/\alpha$.

A partir de cette solution transformée $\bar{T}(x, p) - T_0$ on parvient à la solution originale $T(x, t) - T_0$ à l'aide de la transformation inverse en se référant aux résultats donnés par les tables de transformées [10]. Le choix d'une solution doit correspondre au sens physique de l'équation

phénoménologique pour les conditions que nous avons définies précédemment et appliquées à l'évolution de champ de température dans l'épaisseur du ruban et dans celle de la roue au cours du temps. Les conditions spatio-temporelles sont:

- Conditions initiales:

$$T(x, t \leq 0) = T(x, 0) = T_0 \quad (6)$$

- Conditions aux limites:

$$T(x=0, t) = T_a \quad (7)$$

$$T(x \rightarrow +\infty, \forall t) = 0 \quad (8)$$

Afin d'avoir une solution simplifiée du problème d'échauffement de la roue ou de refroidissement du liquide, nous admettons les conditions suivantes [6,8]:

1) La chaleur latente de cristallisation du liquide est négligée.

2) Les propriétés physiques de l'alliage Al-5% Cu solidifié et de la roue de refroidissement en cuivre ne varient pas avec la température.

3) Le transfert et le contact thermique entre la surface de la roue et celle du ruban solidifié sont considérés comme parfaits ($T_1 = T_2$ à l'interface) et la résistance thermique est négligée (énergie interne nulle).

4) Le transfert thermique dépend de la conduction de la chaleur; dès lors la solution analytique inverse de l'équation (5) adaptée au problème physique et notamment aux conditions (6), (7) et (8) est obtenue à partir de tables des transformées de Laplace [10, 12]:

$$T(x, t) = A + \text{Berf}(x/2\sqrt{\alpha t}) \quad (9)$$

Où $\text{erf}(z) = \left(2/\sqrt{\pi}\right) \int_0^z e^{-\beta^2} d\beta$, est la fonction

erreur dont les valeurs sont bien connues [13].

Une représentation schématique de la variation de la température avec la distance x est montrée sur la (figure 2).

A la distance x, la vitesse de refroidissement du liquide s'écrit, d'après l'équation (9):

$$(\partial T / \partial t)_x = \left(-Bx/2t\sqrt{\pi\alpha t}\right) \exp\left[-(x/2\sqrt{\alpha t})^2\right] \quad (10)$$

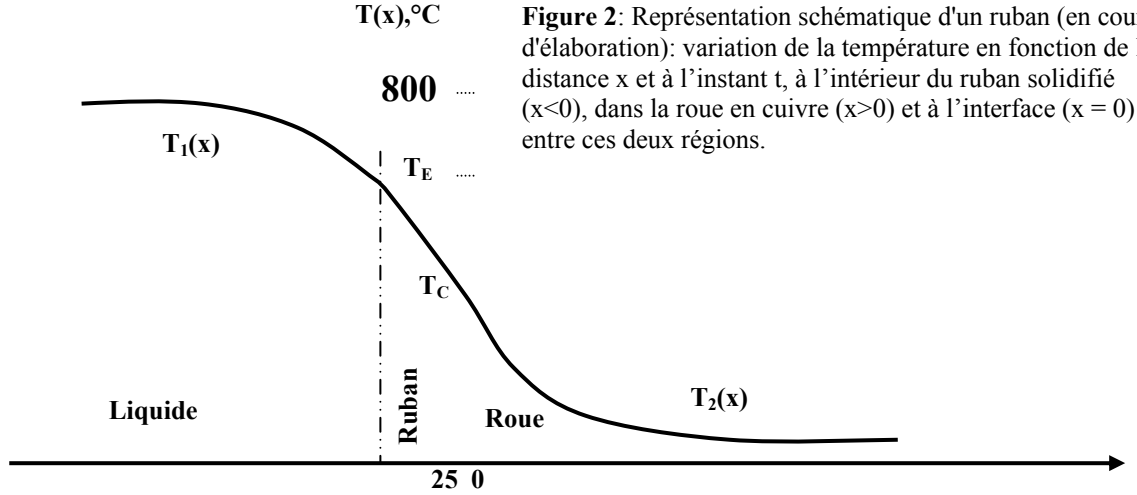


Figure 2: Représentation schématique d'un ruban (en cours d'élaboration): variation de la température en fonction de la distance x et à l'instant t , à l'intérieur du ruban solidifié ($x < 0$), dans la roue en cuivre ($x > 0$) et à l'interface ($x = 0$) entre ces deux régions.

3.2. Calcul de la température T_c de l'interface ruban/roue

La variation de la température, suite à la solidification progressive du ruban est, d'après l'équation (9):

$$T_1(x, t) = A_1 + B_1 \operatorname{erf}\left(x/2\sqrt{\alpha_1 t}\right) \quad (11)$$

Où α_1 est la diffusivité thermique de l'alliage Al-5% Cu. Les constantes A_1 et B_1 sont calculées en imposant au problème, d'une part les conditions aux limites à l'interface ruban solidifié/roue: ($x = 0, t > 0$) et $T_1(x, t) = T_c$ qui est la température de l'interface ruban/roue (figure 2):

$$T_1(x, t) = A_1 + B_1 \operatorname{erf}(0) = T_c$$

D'où:

$$A_1 = T_c, \quad (\operatorname{erf}(0)=0) \quad (12)$$

Et d'autre part, les conditions initiales:

A l'instant $t = 0$, la température de l'alliage Al-5% Cu à l'état liquide est portée à $T_1(x < 0, 0) = 800^\circ\text{C}$.

$$T_1(x, 0) = A_1 + B_1 \operatorname{erf}(-\infty)$$

D'où:

$$B_1 = T_c - 800, \quad (\operatorname{erf}(-\infty)=1) \quad (13)$$

L'expression de la variation de la température du ruban donnée par l'équation (11), devient:

$$T_1(x, t) = T_c + (T_c - 800) \operatorname{erf}\left(x/2\sqrt{\alpha_1 t}\right) \quad (14)$$

De la même manière, la solution donnée par l'équation (9) pour la variation de la température $T_2(x, t)$ (échauffement) dans la roue de refroidissement en cuivre, après son contact avec le liquide, et en lui appliquant les conditions aux limites ($x = 0, t > 0$):

$T_2(0, t) = T_c$, et les conditions initiales ($x > 0, t = 0$): $T_2(x, 0) = 20^\circ\text{C}$, ($\operatorname{erf}(+\infty) = 1$), devient:

$$T_2(x, t) = T_c + (20 - T_c) \operatorname{erf}\left(x/2\sqrt{\alpha_2 t}\right) \quad (15)$$

Où α_2 est la diffusivité thermique du cuivre.

Pour calculer T_c , nous admettons que la quantité de chaleur perdue par le liquide solidifié (ϕ_1) est complètement absorbée par la roue de refroidissement (ϕ_2). La densité de flux de chaleur ϕ est, selon de loi de Fourier, proportionnelle au gradient de température dans la direction x [10]:

$$\phi = -\lambda \partial T(x, t) / \partial x \quad (16)$$

Où λ représente la conductivité thermique du matériau ($\text{Jm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$).

La conservation du flux thermique s'exprime, par l'égalité des deux flux à l'interface ($x = 0$), d'après l'équation (16):

$$\phi_1 = \phi_2 \Rightarrow \lambda_1 (\partial T_1(x, t) / \partial x)_{x=0} = \lambda_2 (\partial T_2(x, t) / \partial x)_{x=0} \quad (17)$$

Où λ_1 et λ_2 sont les conductions thermiques respectivement de l'alliage Al-5% Cu et de la roue en cuivre.

A partir des équations (14) et (15) nous obtenons, pour $x = 0$:

$$\lambda_1 (T_c - 800) / \sqrt{\pi \alpha_1 t} = \lambda_2 (20 - T_c) / \sqrt{\pi \alpha_2 t} \quad (18)$$

Compte tenu des relations $\alpha_1 = (\lambda_1 / c_1 \rho_1)$ et $\alpha_2 = (\lambda_2 / c_2 \rho_2)$ où c_1 , c_2 et ρ_1 , ρ_2 sont, respectivement, les capacités thermiques et les masses volumiques de Al-5% Cu et de la roue en cuivre et, en posant: $b_1 = \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}$, $b_2 = \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}$, appelés effusivité thermique ($Jm^{-2}K^{-1}s^{-1/2}$) respectivement du ruban et de la roue [9], l'expression de T_c , s'obtient finalement [9,10]:

$$T_c = (800b_1 + 20b_2) / (b_1 + b_2) \quad (19)$$

Des équations (14) et (19), le champ de température $T_1(x, t)$ dans le ruban, a pour expression:

$$T_1(x, t) = (800b_1 + 20b_2) / (b_1 + b_2) + b_2 [(20 - 800) / (b_1 + b_2)] \operatorname{erf} \left[x / 2\sqrt{\alpha_1 t} \right] \quad (20)$$

De l'équation (20), on en déduit la vitesse de refroidissement du ruban solidifié en fonction de la distance (x) et du temps de refroidissement (t):

$$\left[\partial T_1 / \partial t \right]_x = \left[-b_2 (20 - 800) x / 2(b_1 + b_2) t \sqrt{\pi \alpha_1} \right] \exp \left[-\left(x / 2\sqrt{\alpha_1 t} \right)^2 \right] \quad (21)$$

3.3. Calcul du temps de solidification

La perte de chaleur du ruban solidifié (Q_{rs}) de teneur en cuivre $w = 5\%$ pds et d'épaisseur moyenne $e = 30 \mu m$, par unité de surface (en cours de solidification) est donnée par la littérature [8]. Pour le cas de notre problème, la perte de chaleur est exprimée comme suit:

$$Q_{rs} = e \rho_1 \left[(1-w)L_{Al} + wL_{Cu} + c_1 (800 - T_E) \right] \quad (22)$$

Où L_{Al} et L_{Cu} sont respectivement les chaleurs latentes des éléments Al et Cu et $T_E (548^\circ C)$ est la température de l'eutectique dans le diagramme d'équilibre Al-Cu. La quantité de chaleur (Q_{roue}) absorbée à l'interface, par la roue tournante de refroidissement en cuivre, pendant le temps t_s de solidification du ruban (dont la chute de température passe de 800 à 548°C) est:

$$Q_{roue} = \int_0^{t_s} \lambda_2 \left[\partial T_2(x, t) / \partial x \right]_{x=0} dt = \quad (23)$$

$$\int_0^{t_s} \lambda_2 (T_c - 20) / \sqrt{\pi \alpha_2 t} dt = (2b_2 / \sqrt{\pi}) (T_c - 20) \sqrt{t_s}$$

En admettant que la roue absorbe complètement la perte de chaleur du liquide totalement solidifié pendant t_s ($Q_{roue} = Q_{rs}$), des équations (22) et (23), t_s s'écrit:

$$t_s = \left[\sqrt{\pi} e \rho_1 \left[(1-w)L_{Al} + wL_{Cu} + c_1 (800 - 548) \right] / 2b_2 (T_c - 20) \right]^2 \quad (24)$$

3.4. Applications numériques : calcul de la vitesse de refroidissement

Le tableau suivant donne les valeurs des paramètres physiques utilisés [14].

Matériau	λ (w/(m°C))	C(J/(kg°C))	ρ (kg/m ³)	L_{Al} (kJ/kg)	L_{Cu} (kJ/kg)
1 : Al-5% Cu	246	890	3013	388,35	204,88
2 : Cu	397	386	8960	-	-

Les valeurs numériques de l'effusivité thermique sont:

$$b_1 = 25683.97 \text{ Js}^{-1/2} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (25)$$

$$b_2 = 37054.67 \text{ Js}^{-1/2} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (26)$$

$$\alpha_1 = 0.00009174 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

La valeur numérique de la température T_c , tirée de l'équation (19), est:

$$T_c = 339.32 \text{ }^\circ \text{C} \quad (27)$$

Et celle du temps t_s , déduite de l'équation (24):

$$t_s = 2.31310^{-6} \text{ s} \quad (28)$$

L'épaisseur moyenne du ruban correspond à la distance $x = -e = -0.000030 \text{ m}$, conséquente à la vitesse de rotation périphérique de la roue de 42 m/s, l'équation (21) donne l'expression de la vitesse de refroidissement en fonction du temps t:

$$\left[\partial T_1(x, t) / \partial t \right]_{x=-0.000030} = (0,407041696 / t \sqrt{t}) \exp \left[-0,000002452 / t \right] \quad (29)$$

Et finalement, la valeur numérique de la vitesse de refroidissement est obtenue, après un temps $t = t_s$, en remplaçant dans l'équation (29):

$$[\partial T_1(x = -0,000030, t) / \partial t]_{t=t_s} = 115711214 \exp(-1.06)$$

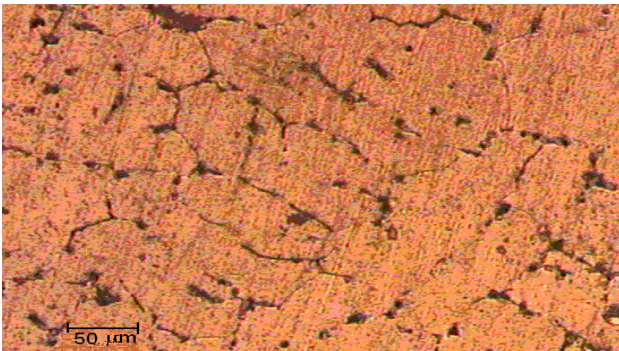
Soit:

$$v = 40085009,56 \text{ } ^\circ\text{C/s} \approx 4.10^7 \text{ } ^\circ\text{C/s} \quad (30)$$

3.5. Microstructure des rubans solidifiés rapidement

Les figures 3a), b) et c) montrent les microstructures de l'alliage Al-5% Cu à l'état brut de coulée et du ruban (surface côté roue) solidifié rapidement, obtenues respectivement par microscopie optique et électronique à balayage (M E B).

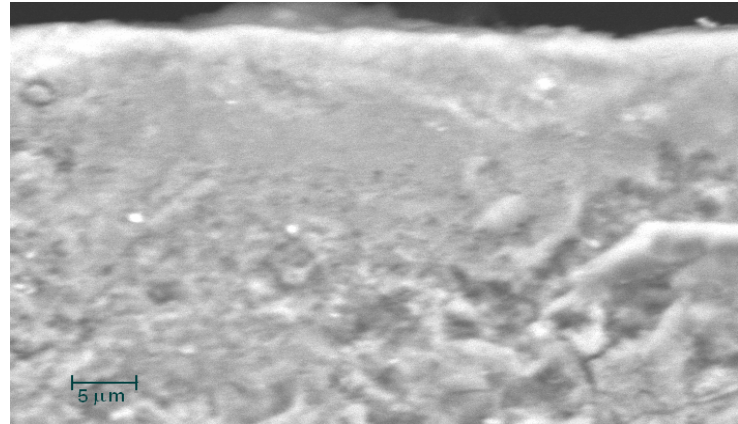
La figure 3a) montre que la précipitation de la phase α -Al primaire est bien cellulaire à grains coaxiaux ($\sim 100 \mu\text{m}$) avec l'eutectique α -Al/ θ (Al_2Cu) (zone noire) précipitant au niveau des joints de grains de la matrice α -Al.



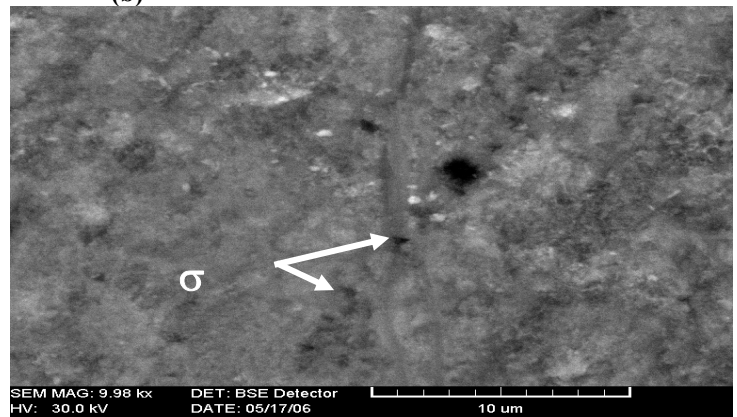
(a)

Les figures 3b) et c) montrent l'effet de la solidification rapide sur la microstructure du même alliage Al-5% Cu, élaboré sous forme de ruban, sous une vitesse de refroidissement de l'ordre de $4.10^7 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ (vitesse périphérique de la roue: 42 m/s). La figure 3b) correspond à la micrographie de la section d'un ruban SR côté roue. On constate la présence, dans la section et vers la surface du ruban (en contact direct avec la roue), d'une zone hypertrempée s'étendant sur environ $12 \mu\text{m}$, et qui révèle clairement l'absence de la précipitation de l'eutectique (en zone plus sombre). A l'intérieur du ruban, la présence d'une nouvelle phase σ (AlCu) est décelée et se distingue par de petites zones, finement dispersées, de couleur plus sombre que celle de l'eutectique. Ce résultat illustre clairement l'inhomogénéité microstructurale dans la section du ruban, attribuée à la différence de vitesse de refroidissement entre l'extrémité et le cœur du ruban. La figure 3c) est la micrographie du même ruban (face côté roue), obtenue après polissage mécanique allant jusqu'à environ une profondeur de $10 \mu\text{m}$. On constate que la microstructure obtenue est analogue à celle correspondant au cœur du ruban du cas précédent. La microstructure est constituée de

micro grains α -Al, de dimension nettement plus fine ($< 3 \mu\text{m}$), avec une précipitation intra granulaire de θ et de la nouvelle phase σ . La solidification rapide a donc un effet notable sur la nature des phases précipitées et sur la taille des grains.



(b)



(c)

Figure 3: Micrographie d'un échantillon de l'alliage Al-5%Cu:

- a) état brut de coulée,
- b) section d'un ruban obtenu par trempe sur roue à la vitesse de $410^7 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ (côté roue vers le haut),
- c) surface du ruban, po

Une analyse élémentaire par DRX [15] sur ces rubans a confirmé la présence de cette phase σ (AlCu) en plus des deux précédentes α -Al et θ (Al_2Cu). L'effet de la vitesse de refroidissement peut aussi influencer la quantité et la nature de la précipitation d'une phase. C'est ainsi qu'une analyse DRX [15] qui a été effectuée sur un ruban élaboré à une vitesse de refroidissement plus faible, correspondant à une vitesse de rotation plus petite de la roue (31.5 m/s) et réalisé dans les mêmes conditions techniques que précédemment, a montré une diminution relative de la quantité de la phase métastable σ . Ce qui permet de suggérer qu'il existe une vitesse de refroidissement critique à partir de laquelle la phase métastable σ serait susceptible d'apparaître.

Notons enfin, à titre indicatif, que l'effet de la solidification rapide sur la dureté est significatif: les mesures de micro dureté HV [15] ont montré une augmentation relativement importante de la dureté qui passe de 165, l'alliage massif à l'état brut de coulée, à 220 pour le ruban solidifié à la présente vitesse de 4×10^7 °C/s.

CONCLUSION

1. La technique de la solidification rapide par trempe sur roue tournante (42 m/s) a permis d'élaborer des rubans d'une épaisseur moyenne de 30 μm .
2. L'utilisation du modèle de transfert thermique dans les conditions d'un choc brutal du liquide sur la roue en cuivre, tout en admettant notamment que le gradient thermique est négligeable suivant la longueur et la largeur des rubans, a permis de calculer leur vitesse de refroidissement qui est de 4.10^7 °C/s.
3. La solidification rapide a influencée fortement la morphologie de $\alpha\text{-Al}$ et de l'eutectique $\alpha\text{-Al}/\theta$ en les transformant sous une forme très dispersée et plus fine. De plus, cette vitesse de refroidissement génère la formation d'une nouvelle phase σ (AlCu) dont la présence est liée à l'augmentation de la vitesse de refroidissement. Cette microstructure, à particules finement dispersées, montre une dureté nettement améliorée.

REFERENCES

- [1] L Katgerman., F Dom, Rapidly solidified aluminium alloys by melt spinning, Mater. Sci. and Eng. A 375-377 (2004) 1212-1216.
- [2] S.C Gill., W Kurz., Rapidly solidified Al-Cu alloys-II. Calculation of the microstructure selection map, Acta Metal.Mater, V.43, Issue 1(1995) 139-151.
- [3] Yan Wang, Zhonghua Zhang, Shaohua Zheng, Sulma Fan, Xin Cheng, Weimin Wang , Xiufang Bian, Haoran Geng, Effet of quenching rate on the microstructure of a rapidly solidified Al-5Sb alloy, J. Alloys and comp. 376 (2004) 165-169.
- [4] Yongchang Liu, Feng Lan, Gencang Yang, Yaohe Zhou, Microstructural evolution of rapidly solidified Ti-Al peritectic alloy, J. Cryst. Growth 271 (2004) 313-318.
- [5] Zhonghua Zhong, Yan Wang, Xinfang Bian, Microstructure selection map for rapidly solidified Al-rich Al-Ce alloys, Journal of Crystal Growth 260 (2004) 557-565.
- [6] X.C. Tong, H.S.Fang, Microstructure characteristics of a rapidly solidified Al-Si-Ti-Pb alloys, Mater.characterization, vol.37, issues 2-3 (1996) 95-104.
- [7] J.W.Xiao, D.C.Xue, D.X.Tian, Y.Y.We, L.W.Xiao, Influencing factors and estimation of the cooling rate within an amorphous ribbon, Intermetallics 12 (2004) 1233-1237.
- [8] J.Chevrier, D.Pavuna, F.Cyrot-Lackman, Cooling rate and microstructure of rapidly solidified Al-20% Si alloys - C.L Xu, H.Y. Wang, F.QIU, Y.F.Yang, Q.C.Jiang, Mat.Sci.and Engi. A, 2006, pp.1233-1237. [7 J. Chevrier, D.pavuna and F. Cyrot-Lackman, Pys.rev.B 36 (1987), pp.9115-9121.", Phys.Rev. B 36(1987).
- [9] C.L Xu., H.Y Wang., F Qiu., Y.F Yang, Q.C Jiang, Cooling rate and microstructure of rapidly solidified Al-20wt.% Si alloy, Mater.Sci. and Eng. A417 (2006) 275-280.
- [10] Sacadura J.F, Initiation au transfert thermique, Ed .Tec et Doc., CAST INSA de Lyon (1993) 45-56.
- [11] A-M. Bianchi, Y. Fautrelle, J. Etay, Transferts thermiques, Agence Universitaire de la Francophonie première édition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes CH-1015 Lausanne (2004) 110-112.
- [12] C. Richard. Dorf, The Engineering Handbook, University of California, Davis ACRC Press Handbook Published Incorporation, IEEE Press.
- [13] A-M Bianchi., Y Fautrelle., et J Etay., Transferts thermiques, Agence Universitaire de la Francophonie première édition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes CH-1015 Lausanne (2004), 129-130.
- [14] E.A Brandes, G.B Brook, (Eds) Smithells, Metals Reference Book., 7th Edition, Butterworth Heinemann, Oxford,1998.
- [15] G. Belgomri., Elaboration et caractérisation des alliages Al-5%Cu et Al-10%Cu solidifiés rapidement, Thèse Magister (Mai 2007), Université Mentouri-Constantine.