

## CHAPITRE XIX : LA DURE VIE D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM (TD)

Y. CHASTEL

### EXERCICE 1 : RAPPEL SUR LES ALLIAGES A DURCISSEMENT STRUCTURAL

De nombreux alliages d'aluminium sont élaborés, des alliages corroyés (servant à produire des pièces par mise en forme de demi-produits) et des alliages de fonderie (solidifiés dans leur forme quasi-définitive). Parmi les alliages corroyés, on distingue les nuances trempantes, c'est-à-dire à durcissement structural, et les nuances non trempantes.

1.1 Donner un exemple d'une nuance à durcissement structural et d'un traitement thermique industriel associé.

1.2 Au cours de la déformation plastique d'un alliage à durcissement structural, quels sont les deux mécanismes principaux de franchissement des secondes phases créées ?

Les tôles d'aluminium utilisées classiquement pour réaliser des pièces de structures automobiles par emboutissage sont les familles 5000 (Al-Mg) et 6000 (Al-Mg-Si). Ces nuances sont les plus adaptées aux applications automobiles quant aux exigences de mise en forme, d'aspect pour les pièces apparentes, de résistance à la corrosion, de rigidité pour les pièces de renfort et également de coût.

Nous nous intéressons dans la suite de ce chapitre à la série d'alliages 5000, Aluminium-Magnésium, qui ne sont pas durcis par précipitation mais par écrouissage.

### EXERCICE 2 : MICROSTRUCTURE DE SOLIDIFICATION

Le diagramme d'équilibre Al-Mg est donné sur la figure 1.

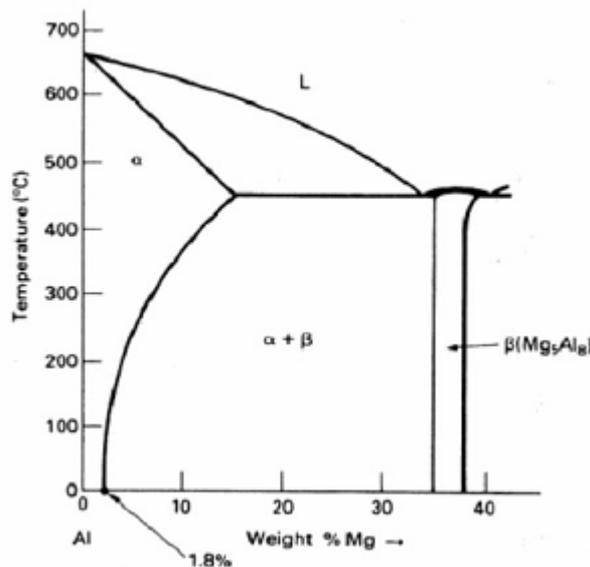


Figure 1 : Portion riche en aluminium du diagramme d'équilibre binaire Al-Mg.

2.1 Que se passe-t-il pour un mélange de composition Al-1%Mg au cours d'un refroidissement quasi-statique depuis l'état liquide (on précisera les températures et les états associés) ?

2.2 Pourquoi la température de fin de solidification sera-t-elle plus basse dans la pratique ?

2.3 La figure 2 présente une image de la structure de solidification de cet alliage. D'après les tailles caractéristiques observées sur cette figure, avec quelle technique d'observation l'image pourrait-elle avoir été obtenue ?

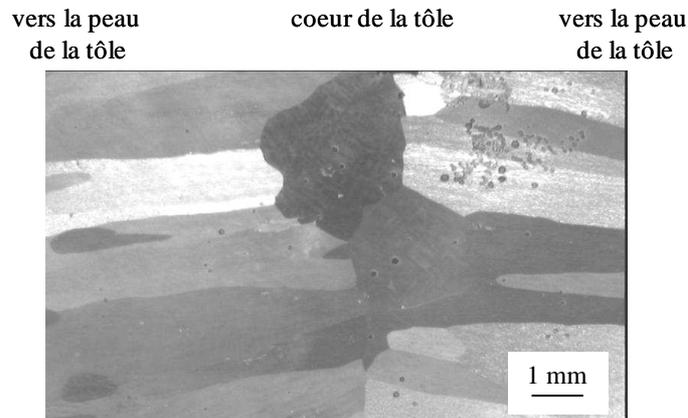


Figure 2 : Microstructure de solidification d'un alliage Al-Mg.

2.4 On distingue deux familles de grains sur la figure 2. Expliquer la morphologie des grains de chacune de ces familles.

2.5 Chaque grain de la figure 6 présente-t-il une composition chimique homogène ? Pourquoi ?

2.6 Indiquer une technique qui permettrait de mesurer l'orientation cristallographique de chacun des grains.

### EXERCICE 3 : MISE EN FORME ET MODIFICATION DE LA MICROSTRUCTURE

On déforme ensuite à froid la tôle solidifiée (écrouissage de  $\epsilon = 1$ ) et on obtient une structure présentée sur la figure 3. La mesure de la contrainte en compression pour ce niveau de déformation est donnée sur la figure 4.

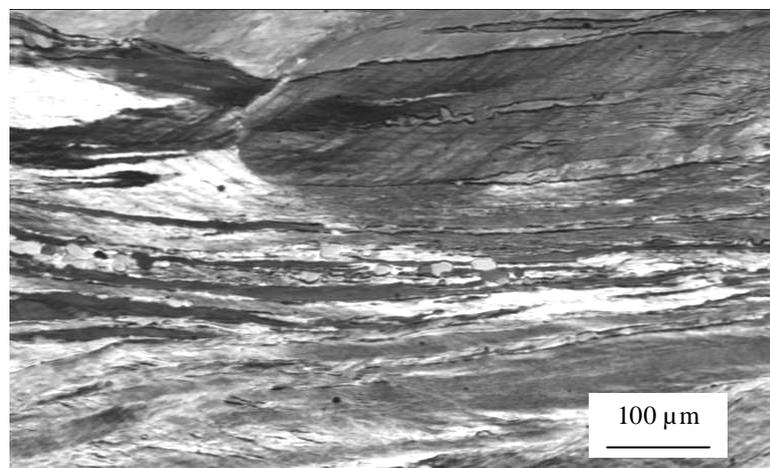


Figure 3 : Microstructure de l'alliage après une forte déformation (compression suivant la direction verticale).

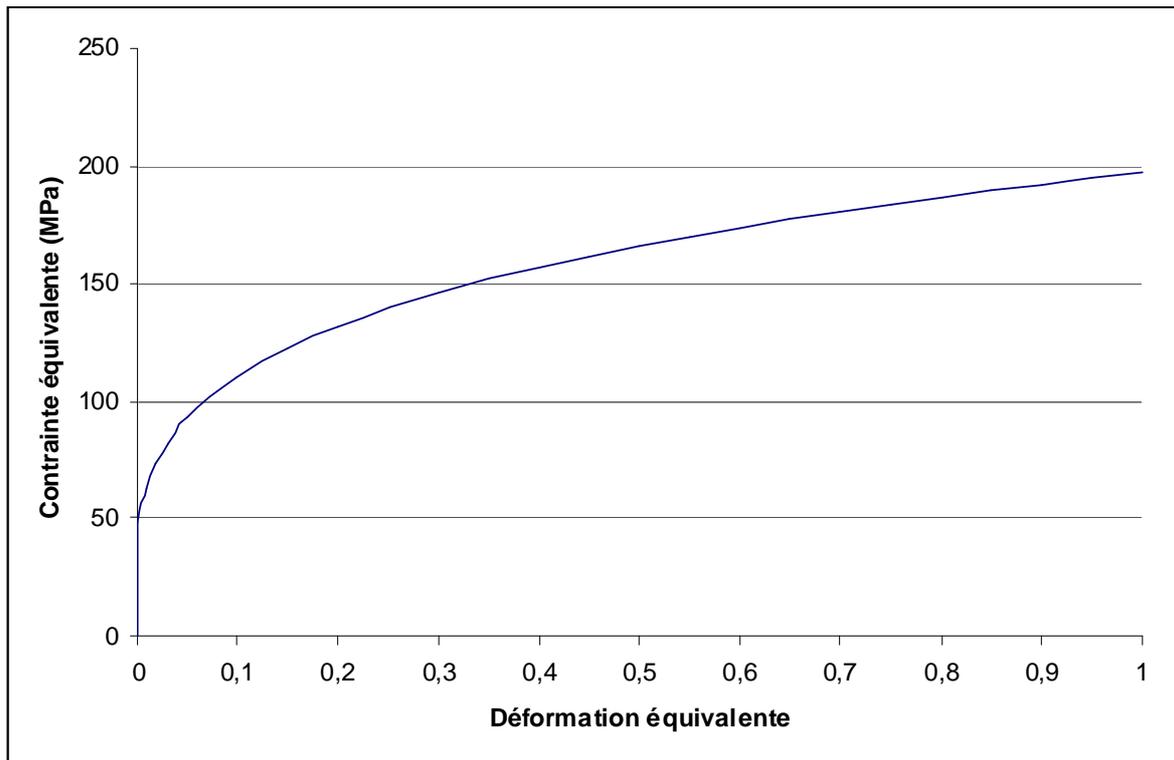


Figure 4 : Courbe contrainte-déformation établie d'après les mesures effectuées lors de la mise en forme.

3.1 Donner un ordre de grandeur du travail à fournir pour déformer ce matériau jusqu'à  $\epsilon = 1$ , par unité de volume.

3.2 Comment se répartit l'énergie dissipée lors de cette déformation ?

3.3 On effectue un traitement thermique à  $300^\circ\text{C}$  pendant 5 minutes et 30 minutes sur des échantillons déformés de  $\epsilon = 1$  (Figure 5). Expliquer la présence d'une nouvelle famille de grains. Quelle loi pourrait-on utiliser pour modéliser cette cinétique de formation de nouveaux grains ?

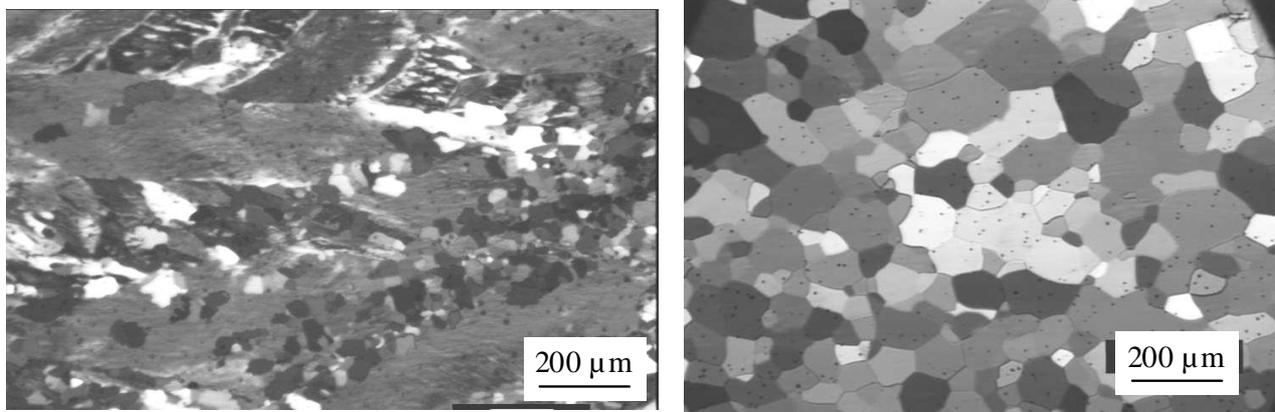


Figure 5 : Microstructure après déformation de 1 à froid, et traitement thermique à  $300^\circ\text{C}$  pendant 5 minutes (image de gauche) et 30 minutes (image de droite).

3.4 On effectue ensuite un traitement thermique identique sur des échantillons ayant subi des taux d'écroissage différents (c'est-à-dire différents niveaux de déformation) et on mesure la taille moyenne des grains après recristallisation complète à une température donnée T1. Les valeurs sont données dans le tableau 1. Tracer la courbe de la taille des grains recristallisés en fonction du taux d'écroissage et expliquer la notion de déformation critique. Quel est l'ordre de grandeur de cette déformation critique ?

TABLEAU 1 : EVOLUTION DE LA TAILLE DES GRAINS APRES RECUIT EN FONCTION DE LA DEFORMATION IMPOSEE AU MATERIAU AVANT RECUIT

<i>Taux d'écroissage</i>	<i>Taille des grains recristallisés (<math>\mu\text{m}</math>)</i>
0,05	Pas de recristallisation
0,1	Pas de recristallisation
0,2	Pas de recristallisation
0,3	150
0,4	98
0,5	72
0,6	48
0,8	41
0,9	39
1	35
1,1	32
1,2	30

3.5 Une tôle emboutie à partir d'un flan plat présentera une géométrie imposée par la mise en forme, si bien que la déformation induite par l'emboutissage sera hétérogène. Les pièces industrielles peuvent présenter des formes complexes qui nécessitent plusieurs opérations avec différents outils. Si l'on souhaite redonner une certaine ductilité au matériau dans certaines zones de la pièce - pour des opérations de finition ultérieures, par exemple -, quel traitement thermique peut-on préconiser (Température à retenir comparativement à T1 pour un traitement thermique et/ou déformation locale subie par le matériau lors de la première mise en forme avant ce traitement thermique) ?



## CHAPITRE XIX : LA DURE VIE D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM (CORRIGE)

Y. CHASTEL

### EXERCICE 1 : RAPPEL SUR LES ALLIAGES A DURCISSEMENT STRUCTURAL

1.1 D'une manière générale, les alliages d'aluminium à durcissement structural : les séries 2000 (Al-Cu et Al-Cu-Mg), 6000 (Al-Mg-Si) , 7000 (Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu).

Un exemple est donné par le chapitre de TD sur les traitements thermiques : l'alliage 2024. Le traitement thermique comporte les étapes suivantes: mise en solution à haute température (environ 500 °C), trempe à l'eau, maturation à l'ambiante, revenu de plusieurs heures à une température modérée (autour de 200 °C).

1.2 Au cours de la déformation, les précipités constituent des obstacles au déplacement des dislocations. D'après le chapitre sur le durcissement et le renforcement des matériaux, deux mécanismes peuvent entrer en compétition : le contournement (mécanisme d'Orowan), et le cisaillement des précipités.

### EXERCICE 2 : MICROSTRUCTURE DE SOLIDIFICATION

2.1 La séquence de solidification en quasi-équilibre est la suivante :

$T > 650^{\circ}\text{C}$  : alliage à l'état liquide

$T \sim 650^{\circ}\text{C}$  : début de la solidification

$630 < T < 650^{\circ}\text{C}$  : domaine biphasé liquide + phase solide riche en Al ( $\alpha$ )

$T \sim 630^{\circ}\text{C}$  : fin de la solidification (en supposant une descente en température quasi-statique)

$T < 630^{\circ}\text{C}$  : une phase solide ( $\alpha$ )

2.2 La diffusion est loin d'être instantanée dans la phase solide, si bien que les premiers cristaux solidifiés conserveront quasiment leur composition chimique de début de solidification. Lorsque la température continue de descendre, la solidification progresse et les nouveaux cristaux solides possèdent une composition chimique donnée par la ligne de solidus d'un diagramme à l'équilibre. Les domaines solides présentent donc un gradient de composition chimique, et la ligne de solidus réelle, hors équilibre, est obtenue en considérant la composition moyenne du volume solide. Cette ligne de solidus est décalée par rapport à celle d'un diagramme d'équilibre. Et ce décalage induit une température de fin de solidification plus basse. Se rapporter au TD sur la solidification.

Une autre manière de formuler le phénomène dans le cas de l'alliage qui nous intéresse est que la phase solide s'enrichit moins en Mg que ne le prévoit l'équilibre (Mg n'a pas le temps de diffuser jusqu'au cœur du solide pour enrichir celui-ci tout au long de la solidification). Le liquide est donc « plus riche » en Mg que ne le prévoit l'équilibre, sa température de solidification est donc plus basse.

2.3 Etant donnée la taille de grains millimétrique, voire centimétrique de cet alliage, et grâce aux tableaux du chapitre sur les microstructures, on peut supposer que l'image a été prise par microscopie optique. Information complémentaire : il a fallu révéler les grains par contraste, ici grâce à l'utilisation de la lumière polarisée.

2.4 Le refroidissement se produit à partir des parois verticales (gauche et droite de l'image), donc suivant un gradient de température horizontal. Chaque grain est constitué de dendrites d'axes primaires parallèles. On identifie :

- des grains colonnaires (horizontaux et allongés) croissant vers le centre (germination sur les parois) à partir des deux parois latérales

- des grains équiaxes (quasi-sphériques) dans la bande centrale (germination au cœur de la pièce et croissance radiale).

2.5 Cf question 2.2. Chaque grain est constitué de dendrites dont les axes primaires sont parallèles les uns aux autres. C'est le résultat de la solidification à partir d'un germe. On obtient, comme expliqué ci-dessus à la question 2.2, des gradients de composition chimique lors de la solidification, i.e. une ségrégation mineure (par opposition à la ségrégation majeure à l'échelle de la pièce solidifiée complète).

2.6 On peut donner deux exemples : la diffraction des électrons rétro-diffusés (EBSD), ou des rayons X (la taille de grains est suffisante ici au regard de la résolution spatiale standard de cette dernière, aux alentours de 100  $\mu\text{m}$ ).

### EXERCICE 3 : MISE EN FORME ET MODIFICATION DE LA MICROSTRUCTURE

3.1 Travail pour effectuer la déformation plastique = Aire sous la courbe estimée par l'aire du trapèze (0 ;0) (1;0) (1;200) (0;100), soit environ 150  $\text{J/m}^3$ .

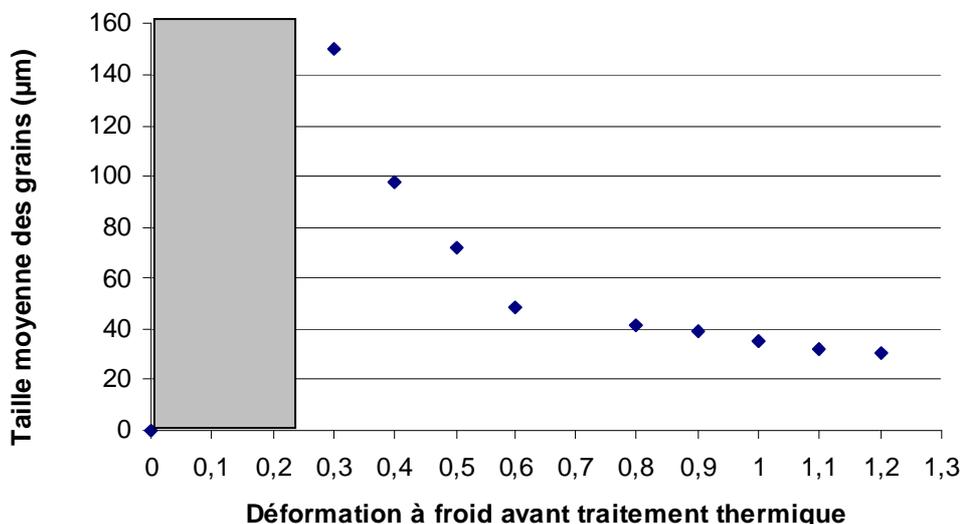
3.2 L'énergie dissipée lors de cette déformation se répartit en deux termes :

- Auto-échauffement pour environ 90 %,
- Création de défauts (essentiellement des dislocations) et évolution de la microstructure pour les 10% restants.

3.3 On a affaire ici à de la recristallisation par germination et croissance de nouveaux grains (présentant une orientation cristallographique propre et contenant très peu de défauts) à l'état solide qui peut être modélisée, par exemple, à l'aide de la loi d'Avrami.

Leur croissance est en effet gouvernée par la diffusion, plus précisément, par la mobilité des joints de grains, gouvernée elle-même par la diffusion à courte distance (pas de diffusion d'éléments chimiques).

3.4 La courbe est tracée sur la figure ci-dessous. La zone grise symbolise l'absence de recristallisation. La déformation critique correspond ici à l'apparition de la recristallisation : on passe brutalement d'une structure déformée à une structure recristallisée à très gros grains. La valeur de cette déformation critique se situe entre 0,2 et 0,3 d'après la courbe.



### 3.5 Deux cas peuvent se présenter.

Si la déformation locale est partout largement supérieure à la déformation critique, il faudra faire le traitement thermique à une température supérieure ou égale à  $T_1$ , pour garantir une germination et une croissance faciles des grains (plus la température est élevée, plus la germination et la croissance sont faciles ici). Plus il y a de germes et plus il y a de grains. Si la croissance est facile, tous les grains vont croître de la même façon et la taille de grains sera homogène. On aboutira ainsi à une taille de grains fine. Il faut éviter les gros grains qui se « voient » après emboutissage + peinture (c'est rhédibitoire dans l'automobile...).

Si la déformation locale peut être inférieure à la déformation critique, la recristallisation de ces zones n'est pas garantie même à une température supérieure à  $T_1$ ... et les zones à peine plus déformées peuvent présenter de gros grains nuisibles à l'aspect esthétique de la pièce finie. Il faut donc faire d'autres essais de déformation + traitements thermiques, à des températures différentes, pour affiner la connaissance du matériau et définir le traitement thermique le plus approprié pour écarter tout risque.