

Comportement Mécanique des Matériaux

EPFL - Cours MSE 234, Edition 2025

Série d'exercices 6 du mercredi 12 novembre

Exercice 3-11

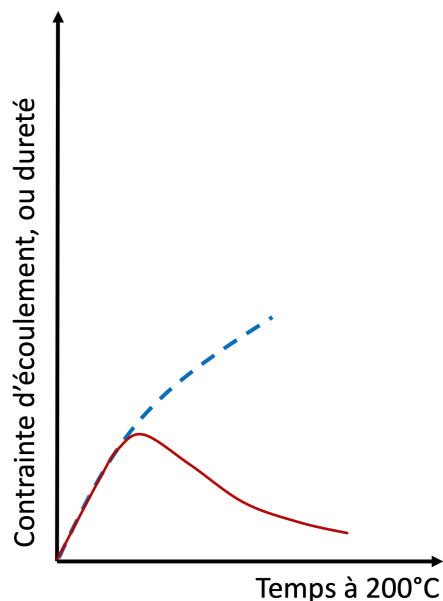
Le Lasagnium est un alliage des atomes Patium et Tomatium. Il s'y forme des précipités To_3Pa_2 qui durcissent efficacement l'alliage après mis en solution, trempe et traitement de précipitation à $200^\circ C$.

Cet alliage a ceci de particulier que dans la gamme Pa-1%To à Pa-3%To, les mêmes précipités se forment, germinent à un taux (nombre de germes/ m^3s) proportionnel à la teneur en To, puis croissent (par précipitation et/ou maturation) à la même vitesse quelle que soit la composition de l'alliage.

Ci-dessous vous voyez la courbe de durcissement de l'alliage Pa-1%To.

a - Pouvez-vous esquisser ce à quoi devrait ressembler la même courbe pour l'alliage Pa-3%To ? Justifiez votre esquisse par le raisonnement.

b - Le temps de durcissement maximal est-il le même pour les deux alliages ?



Exercice 3-12

Vous travaillez pour l'entreprise Metal Rigolade & Co. Votre chef, Jacques Wunderboss, vous envoie le mémorandum suivant.

“Nous avons un problème avec une pièce de fuselage d'un avion, que nous avons conçue et assemblée dans nos usines. Elle mesure 5 mètres de long, 2 de large, et est entièrement en alliage d'aluminium 2024 T6 (revenu à $190^\circ C$ pendant une heure). La pièce avait été déformée accidentellement pendant l'assemblage et rectifiée manuellement par l'ouvrier (pour cela il a fallu la chauffer à $350^\circ C$ car elle était trop dure à plier sinon).

Le client s'est plaint car cette pièce s'est déformée en service. Nous avons mesuré la résistance mécanique du métal de la pièce, et la limite d'élasticité est en effet inférieure à ce

qu'elle devrait être: sa valeur est $R_e = 260$ MPa au lieu de la valeur $R_e = 340$ MPa caractéristique de l'alliage 2024 T6.

Pouvez-vous m'expliquer ce qui a pu se passer ? La déformation accidentelle, ou la rectification ont-ils pu entraîner une telle chute des propriétés ? Est-ce réversible ?”
Que lui répondez-vous ?

Exercice 3-14

Sur la page suivante vous trouverez des données et graphes extraits du «ASM Handbook », livre de référence pour les propriétés des métaux et alliages, ici pour l'alliage 6061.

L'état O désigne un alliage qui n'a pas subi d'autre traitement thermique qu'un recuit complet visant à minimiser sa dureté après déformation.

L'état T4 désigne un alliage qui a été soumis à un traitement de mise en solution puis a été trempé.

L'état T6 désigne un alliage qui a été soumis à un traitement de mise en solution puis a été trempé, comme pour l'état T4, puis a été soumis à un traitement de revenu (« aging ») jusqu'au maximum de dureté à la température de revenu en question.

a – L'alliage 6061 est-il un alliage de corroyage ou de fonderie ?

b – Pourquoi pouvez-vous dire en regardant sa composition (ou le premier chiffre de sa désignation) que c'est un alliage que l'on peut durcir par durcissement structural ?

c – Quelle est la raison physique pour laquelle l'état T6 donne un alliage plus dur que l'état T4 ?

d – Pouvez-vous donner une explication au fait que la limite d'élasticité et la contrainte à rupture de l'alliage à l'état T6 commencent à chuter de façon plus abrupte au-delà de 150 °C (Tableau 84)?

e – Quelle est l'utilité de l'état O pour cet alliage; en d'autres mots quand est-il bénéfique que l'alliage soit dans cet état de dureté minimale ?

6061 Alclad 6061
1.0Mg-0.6Si-0.30Cu-0.20Cr

Specifications

AMS. See Table 82.

ASTM. See Table 82.

UNS. A96061

Government. See Table 82.

Foreign. Canada: CSA GS11N. France: NF A-G5UC. United Kingdom: BS H20. ISO: AlMg1SiCu

Chemical Composition

Composition limits of 6061. 0.40 to 0.8 Si, 0.7 Fe max, 0.15 to 0.40 Cu, 0.15 Mn max, 0.8 to 1.2 Mg, 0.04 to 0.35 Cr, 0.25 Zn max, 0.15 Ti max, 0.05 max other (each), 0.15 max others (total), bal Al

Composition limits of Alclad 6061. 7072 cladding—0.7 Si max + Fe, 0.10 Cu max, 0.10 Mn max, 0.10 Mg max, 0.8 to 1.3 Zn, 0.05 max other (each), 0.15 max others (total), bal Al

Fabrication Characteristics

Solution temperature. 530 °C (985 °F)

Aging temperature. Rolled or drawn products: 160 °C (320 °F); hold at temperature for 18 h. Extrusions or forgings: 175 °C (350 °F); hold at temperature for 8 h

Applications

Typical uses. Trucks, towers, canoes, railroad cars, furniture, pipelines, and other structural applications where strength, weldability, and corrosion resistance are needed

Mechanical Properties

Tensile properties. See Tables 83 and 84.

Shear strength. See Table 83.

Hardness. O temper: 30 HB; T4, T451 tempers: 65 HB; T6, T651 tempers: 95 HB. Data obtained using 500 kg load, 10 mm diam ball, and 30 s duration of loading

Elastic modulus. Tension, 68.9 GPa (10.0 × 10⁶ psi); compression, 69.7 GPa (10.1 × 10⁶ psi)

Fatigue strength. O temper: 62 MPa (9 ksi). T4, T451, T6, and T651 tempers: 97 MPa (14 ksi). Data correspond to 5 × 10⁸ cycles of completely reversed stress in R.R. Moore type tests.

Mass Characteristics

Density. 2.70 g/cm³ (0.098 lb/in.³) at 20 °C (68 °F)

Table 83 Typical mechanical properties of alloy 6061

Temper	Tensile strength		Yield strength		Elongation, %		Shear strength	
	MPa	ksi	MPa	ksi	1.6 mm (1/16 in.) thick specimen	13 mm (1/2 in.) diam specimen	MPa	ksi
Bare 6061								
O.....	124	18	55	8	25	30	83	12
T4, T451	241	35	145	21	22	25	165	24
T6, T651	310	45	276	40	12	17	207	30

Table 84 Typical tensile properties of alloy 6061-T6 or T651 at various temperatures

Temperature		Tensile strength(a)		Yield strength (0.2% offset)(a)		Elongation, %
°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi	
-196	-320.....	414	60	324	47	22
-80	-112.....	338	49	290	42	18
-28	-18.....	324	47	283	41	17
24	75.....	310	45	276	40	17
100	212.....	290	42	262	38	18
149	300.....	234	34	214	31	20
204	400.....	131	19	103	15	28
260	500.....	51	7.5	34	5	60
316	600.....	32	4.6	19	2.7	85
371	700.....	24	3	12	1.8	95

(a) Lowest strength for exposures up to 10 000 h at temperature, no load; test loading applied at 35 MPa/min (5 ksi/min) to yield strength and then at strain rate of 5%/min to fracture

Exercice 3-17

La microstructure initiale de trois échantillons ayant la forme de plaques à section rectangulaire de dimensions 15 x 15 x 5 mm, en aluminium pur à 99.5%, déformés puis recuits à 600 °C pendant 6h, est représentée en Fig. 3 ci-dessous.

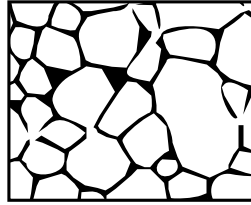


Fig. 3 : Microstructure des échantillons d'aluminium pur 99.5 % recuits à 600 °C pendant 6h. Grossissement 100X (1 cm correspond à 100 µm)

Ces trois échantillons subissent ensuite les traitements suivants :

- 1) L'échantillon 1 est déformé à froid à l'aide d'un laminoir pour réduire son épaisseur à 4.6 mm, ce qui correspond à un taux de déformation en compression de $e = 8.3 \%$. Cet échantillon 1 subit ensuite un recuit d'1h à 500 °C.
- 2) L'échantillon 2 est déformé à froid à l'aide d'un laminoir pour réduire son épaisseur à 4.4 mm, ce qui correspond à un taux de déformation en compression de $e = 12.8 \%$. Cet échantillon 2 subit ensuite un recuit d'1h à 500 °C.
- 3) L'échantillon 3 subit uniquement un recuit d'1h à 500 °C.

a) - À quel numéro d'échantillon correspondent chacune des trois microstructures ci-dessous, prises au même grossissement que la Fig. 3 ?

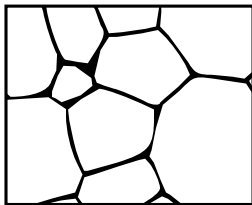


Fig. 4

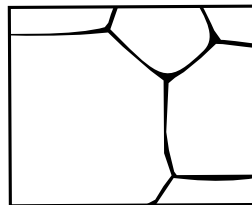


Fig. 5

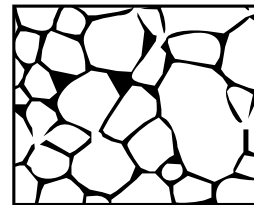


Fig. 6

Figure 4: Echantillon n° ____ car _____

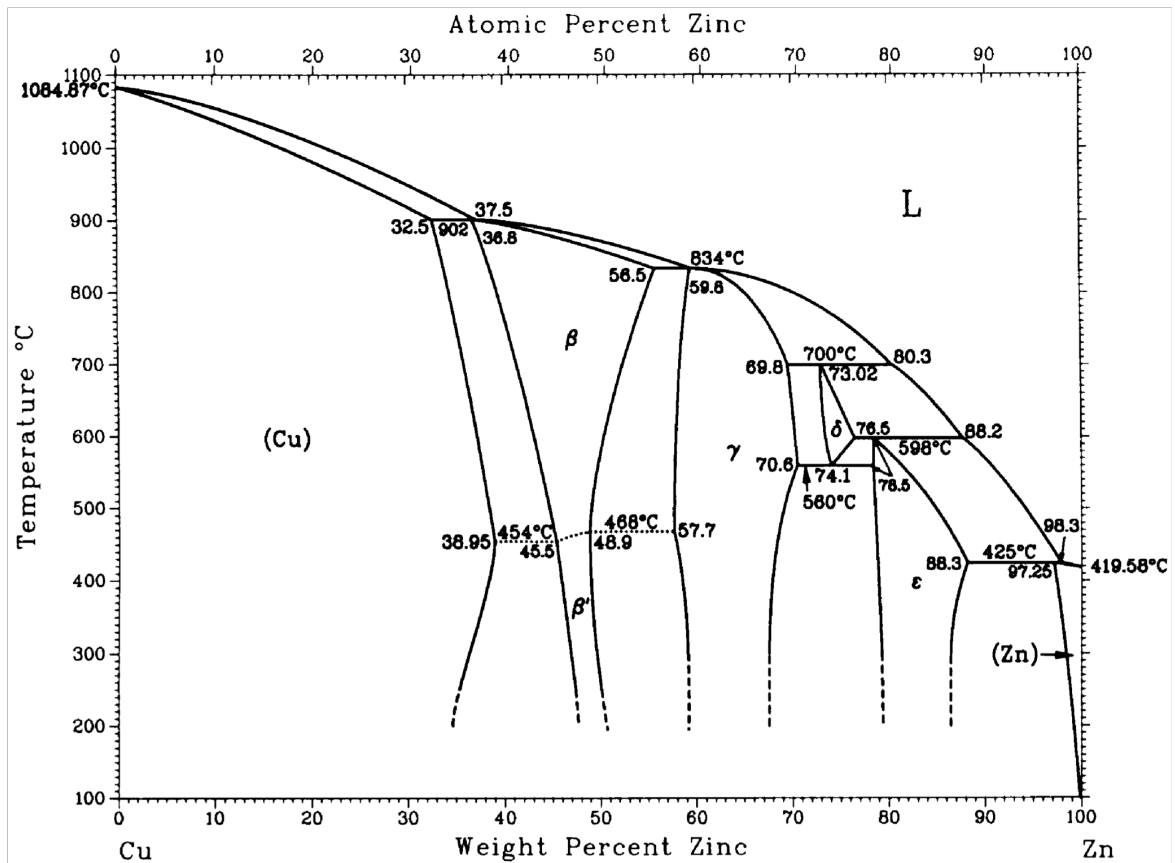
Figure 5: Echantillon n° ____ car _____

Figure 6: Echantillon n° ____ car _____

b) - Lequel de ces trois échantillons aura la dureté la plus élevée et pourquoi ?
L'échantillon n° ____

Exercice 3-20

Ci-dessous vous trouverez le diagramme binaire Cu-Zn. Pour rappel, le fait que les lignes verticales du diagramme sont en pointillé en dessous d'une certaine température dans le diagramme indique que dans ces gammes de température inférieures la composition des phases en présence cesse d'évoluer car la diffusion devient trop lente. En d'autres mots, quand la ligne verticale devient pointillée la microstructure cesse d'évoluer lors du refroidissement de l'alliage.



Pouvez-vous répondre aux questions suivantes:

a – Quelle est la teneur en zinc maximale des laitons monophasés ?

b – quelle est la teneur en zinc habituelle du laiton biphasé ?

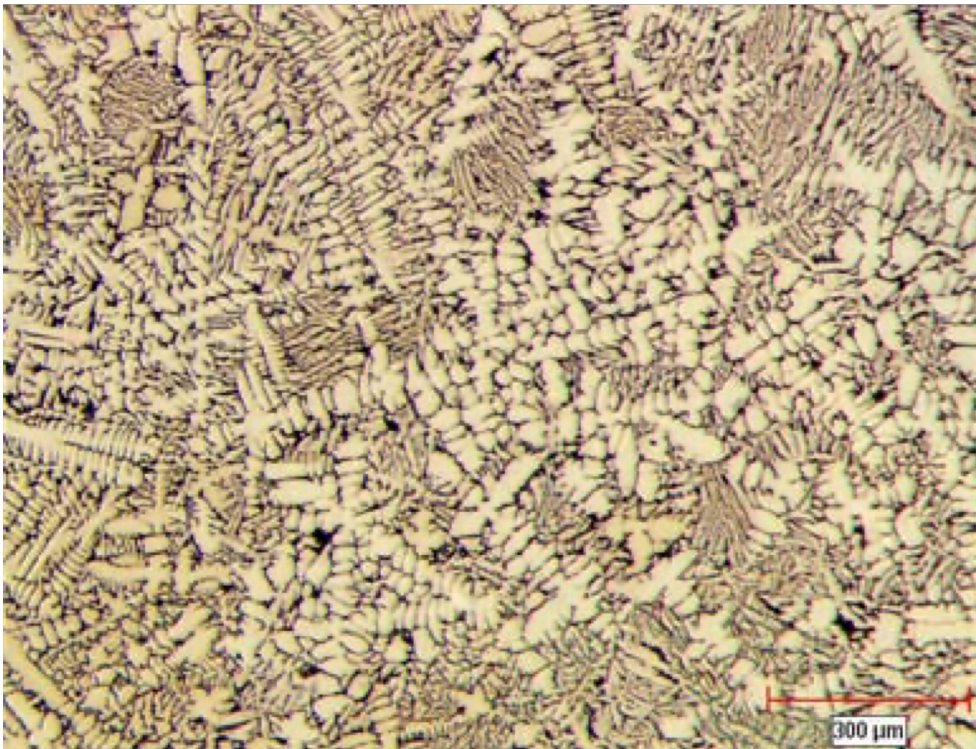
c - quelle est la différence entre les phases β et β' ?

d – Pourquoi le laiton biphasé est-il habituellement mis en forme à température élevée (“à chaud”) ?

e – La pièce en laiton ci-dessous a été mise en forme par emboutissage puis a servi dans un environnement comportant de l’ammoniaque en solution aqueuse. Par quel mécanisme s’est-elle fissurée et quelle solution pouvez-vous proposer pour que cet alliage puisse être utilisé dans cet environnement sans se fissurer ?



f – Ci-dessous vous trouverez une microstructure de l’alliage Cu-36% Zn brut de coulée. La structure a été polie puis soumise à une attaque chimique qui rend la couleur du métal d’autant plus foncée que sa teneur en zinc est élevée.

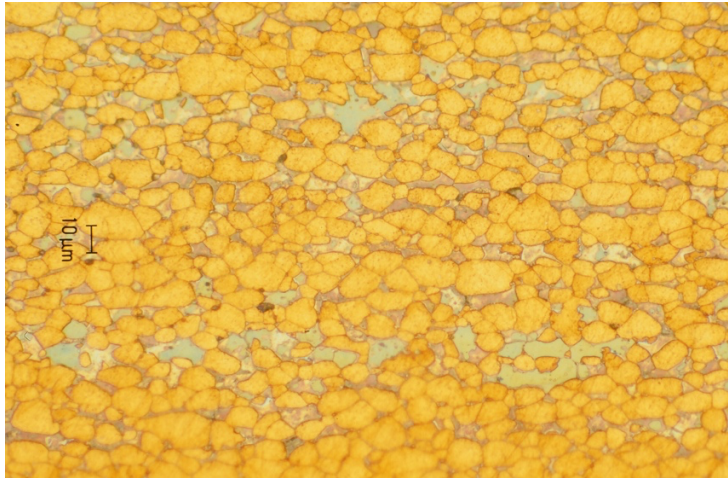


On voit des variations dans la couleur de ce métal et donc de la teneur en zinc, au sein de cette structure brute de coulée d’un métal censé être monophasé selon le diagramme de phase. Comment ce phénomène s’appelle-t-il et à quoi est-il dû ?

g – Est-il possible que l’on trouve la phase β' au sein de cette microstructure et pourquoi ?

h - Quel traitement préconiseriez-vous pour réduire ou supprimer les gradients de concentration en zinc au sein de cette structure de l’alliage Cu-36%Zn ? (donnez les valeurs de paramètres là où vous le pouvez) ?

i – ci-dessous vous trouverez la microstructure d’un laiton biphasé. Pouvez-vous indiquer les phases en présence dans cette microstructure (marquez-les directement sur la micrographie) ?

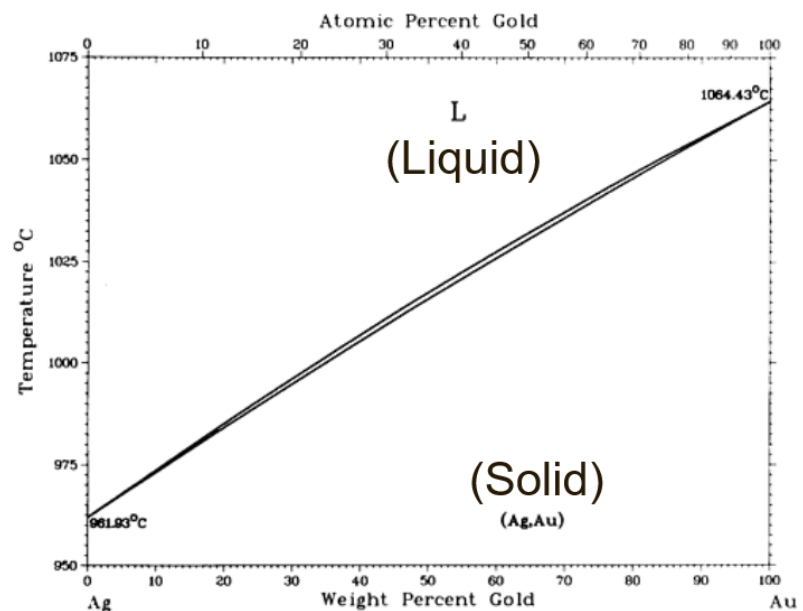


Exercice 3-21

Le diagramme de phase Au-Ag* est donné ci-dessous. En dessous de 950 °C il ne montre rien : la solubilité mutuelle reste totale entre ces deux métaux de structure cristalline cubique à faces centrées et aucune autre phase n'apparaît.



(*ces alliages d'or et d'argent, souvent avec un peu d'autres métaux comme le cuivre ou le platine et connus sous le nom d'Electrum, sont produits depuis l'antiquité (3^{ème} millénaire avant JC en Egypte); la pièce en Electrum dont l'image apparaît à gauche date de la civilisation Lydienne au 6^{ème} siècle avant JC).



a – Quelle est à 20°C la structure d'équilibre de ces alliages ?

b – Si on les déforme après solidification, ces alliages peuvent être durcis par trois mécanismes de durcissement. Nommez ces trois mécanismes et détaillez comment vous

feriez pour les appliquer tous dans une même pièce de ce métal fortement déformée en phase solide.

c – Pouvez-vous nommer un alliage du cuivre et un alliage du fer, tous deux vus dans ce cours et qui ont une structure d'équilibre similaire à celle des alliages Au-Ag ?

Exercice 3-24

Vous travaillez toujours pour l'entreprise Metal Rigolade & Co, laquelle s'est reconvertie dans les alliages du cuivre. Votre chef, Jacques Wunderboss, vous envoie le mémorandum suivant.

“Nous avons un problème avec un de nos clients. Il a livré pour un grand hôtel une centaine d'éviers produits avec notre laiton 70-30. Ces éviers de salle de bain sont produits par emboutissage à froid et polis sur leur surface interne, puis sont montés sans autre opération. Ce client n'est pas content car ces éviers se fissurent, tout seuls, surtout s'ils sont nettoyés souvent. Il nous accuse de lui avoir livré un laiton défectueux.

a - Que lui répondez-vous ?

b - Jacques Wunderboss vous demande aussi si vous pouvez trouver une solution pour remédier à la situation. Que lui répondez-vous ?