

| Identification de l'étudiant(e) | | | | Réservé | |
|---|---|--|-------------------|--|----|
| Nom : | | Prénom : | | Q1 | /5 |
| Signature : | | Matricule : | Groupe : | Q2 | /9 |
| Sigle et titre du cours | | Groupe | | Q3 | /3 |
| MTR2000 Matériaux métalliques | | Tous | | Q4 | /8 |
| Professeurs | | Local | | /25 | |
| Richard Lacroix | | A-476 | | | |
| Trimestre | | Téléphone | | | |
| Hiver 2011 | | 4771 | | | |
| Jour | Date | Durée | Heures | | |
| Jeudi | 10 février 2011 | 1 h 30 | 18 h 30 - 20 h 00 | | |
| Documentation | | Calculatrice | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toute <input type="checkbox"/> Voir directives particulières | | <input type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toutes <input checked="" type="checkbox"/> Non programmable | | Les cellulaires, agendas électroniques ou téléavertisseurs sont interdits. | |
| Directives particulières | | | | | |
| 1. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de points accordés à la question, le total est de 25 points. 2. Pour les questions nécessitant des calculs ou une justification, aucun point ne sera accordé à la bonne réponse si le développement n'est pas écrit. 3. Utilisez les espaces prévus ou la page opposée pour vos calculs. 4. Un formulaire général est à la dernière page. | | | | | |
| Important | Cet examen contient <input type="text" value="4"/> questions sur un total de <input type="text" value="10"/> pages. (excluant cette page) | | | | |
| | La pondération de cet examen est de <input type="text" value="25"/> % | | | | |
| | Vous devez répondre sur : <input checked="" type="checkbox"/> le questionnaire <input type="checkbox"/> le cahier <input type="checkbox"/> les deux | | | | |
| | Vous devez remettre le questionnaire : <input checked="" type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non | | | | |

Question N°1

Courbe de traction

(5 points)

Après avoir réalisé, à 20°C, un essai de traction sur une éprouvette d'alliage d'aluminium, un métal ductile, dont la section droite S_0 est égale à 75,00 mm² et dont la longueur initiale L_0 est égale à 150,00 mm, on a obtenu les résultats partiels suivants :

$E = 70 \text{ GPa}$ $R_m = 90 \text{ MPa}$ $A = 28 \%$

Au cours de l'essai de traction, la limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ est atteinte pour un allongement absolu total de l'éprouvette de 0,375 mm.

a) Quelle est la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % de déformation plastique de cet alliage ? (2 points)

| | |
|--|--|
| <p>Calculs :</p> <p>On applique la loi de Hooke au triangle abc (voir figure) :</p> <p>$R_{e0,2} = E \epsilon_e$</p> <p>Pour obtenir la déformation élastique ϵ_e (segment ac), il faut déduire la déformation plastique ϵ_p à $R_{e0,2}$ (segment Oa = 0,2 %) de la déformation totale ϵ_t</p> <p>$\epsilon_t = \Delta l / l_0 = 0,375 \text{ mm} / 150 \text{ mm} = 0,25 \%$ (segment Oc = 0,25 %)</p> <p>Alors:</p> <p>$R_{e0,2} = (70 \text{ GPa}) (0,25 \% - 0,2 \%) = 35 \text{ MPa}$</p> | |
| $R_{e0,2} = 35 \text{ MPa}$ | |

b) Si, après avoir atteint une contrainte de 65 MPa au cours de l'essai de traction, on décharge l'éprouvette et que l'on reprenne l'essai de traction, quelle sera la nouvelle limite d'élasticité R_e^* (en MPa) de cet alliage d'aluminium ? Justifiez votre réponse. Quel nom donne-t-on à ce phénomène ? (2 points)

| |
|--|
| $R_e^* = 65 \text{ MPa}$ |
|--|

Justification :

Pour mettre en mouvement les dislocations au cours d'une remise en charge du matériau après une pré-déformation, il faut appliquer une contrainte égale à celle qui était appliquée à ces dislocations au moment de la décharge. Donc, dans le système initial d'axes « $\sigma - \epsilon$ », la nouvelle limite d'élasticité R_e^* sera égale à la contrainte σ à laquelle on a déchargé le matériau (ici $\sigma = 65 \text{ MPa}$).

| | |
|---------------------------|--|
| Nom du phénomène : | <u>durcissement par écrouissage (ou par pré-déformation)</u> |
|---------------------------|--|

- c) Citez au moins une autre méthode pour obtenir un effet semblable sur la limite d'élasticité de l'aluminium. (1 point)

Réponse :

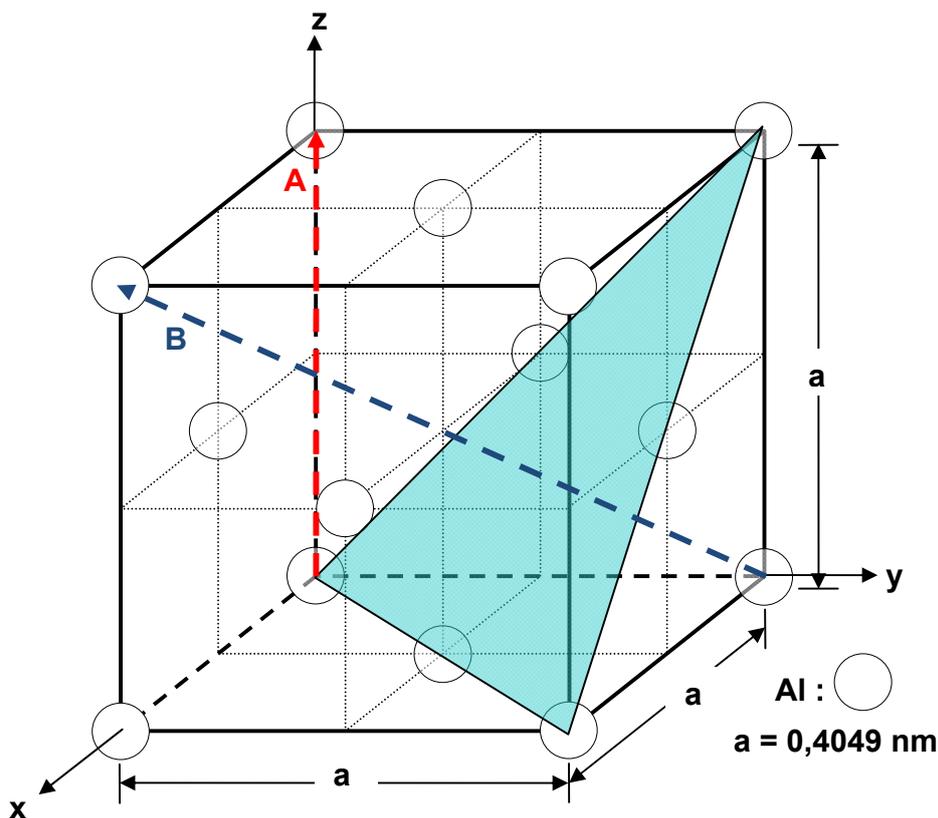
Durcissement par solution solide (d'insertion ou de substitution) ou

durcissement par affinement de la taille des grains

Question N°2 Architecture atomique et glissement (9 points)

L'aluminium cristallise selon le réseau de Bravais cubique à faces centrées montré ci-dessous. Les plans de glissement cristallographiques associés à ce réseau sont des plans appartenant à la famille $\{111\}$.

- a) Tracez, dans la maille ci-dessous, le plan $(1\bar{1}1)$. (1 point)



On réalise un essai de traction sur un monocristal d'aluminium de haute pureté (teneur en Al = 99,998 % poids) et on étudie **uniquement** les possibilités de glissement cristallographique dans le plan $(1\bar{1}1)$. Deux directions possibles de traction sont considérées : la direction $A = [001]$ et la direction $B = [1\bar{1}1]$.

Conseil : l'utilisation du produit scalaire ou du produit vectoriel de deux vecteurs peut s'avérer utile à la résolution de certaines des questions suivantes.

- b) Pour quelle direction de traction, **A** ou **B**, se produira le glissement cristallographique dans le plan $(1\bar{1}1)$? *Justifiez votre réponse.* (1 point)

direction (**A** ou **B**): **A**

Calculs et justifications :

Les deux directions de traction $A = [001]$ et $B = [1\bar{1}1]$ sont tracées dans la maille de la page précédente. On constate que la direction $B = [1\bar{1}1]$ est normale au plan $(1\bar{1}1)$. Par conséquent, si l'on applique une force de traction selon la direction $B = [1\bar{1}1]$, il n'y aura aucune composante de cisssion dans le plan $(1\bar{1}1)$, donc il n'y a pas de glissement cristallographique possible pour cette direction de traction. Seule une force de traction appliquée selon la direction $A = [001]$ pourra produire un glissement cristallographique dans le plan considéré.

- c) Selon la direction de traction choisie, quels seront les systèmes de glissement activés? *Justifiez votre réponse.* (1,5 point)

Systèmes de glissements activés : $(1\bar{1}1)[011]$ et $(1\bar{1}1)[\bar{1}01]$

Calculs et justifications :

Il faut **calculer le facteur de Schmid $\cos\theta \cdot \cos\chi$** associé à chacune des trois directions de glissement du plan $(1\bar{1}1)$, sachant que la direction de traction est $[001]$. En utilisant le produit scalaire pour obtenir : premièrement, l'angle χ entre la direction de traction $[001]$ et la normale au plan $(1\bar{1}1)$; deuxièmement, les angles θ_1 , θ_2 et θ_3 définis par la direction de traction $[001]$ et chacune des directions de glissement ($[110]$, $[011]$ et $[\bar{1}01]$).

On obtient les résultats suivants :

Angle χ : $\cos \chi = \frac{1}{\sqrt{3}}$ alors $\chi = 54,74^\circ$

Pour $\theta_1 = 90^\circ$, il n'y a **pas de cission** (donc **pas de glissement**) selon cette direction. $[110]$

Pour $[011]$ et $[\bar{1}01]$, $\cos\theta_2 = \cos\theta_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}$ alors $\theta_2 = \theta_3 = 45^\circ$

Le facteur de Schmid selon les directions $[011]$ et $[\bar{1}01]$ est le même et le glissement sera également activé dans ces deux systèmes.

- d) Quelle est la longueur du vecteur de Burgers **b** (en nm), associé aux dislocations dans l'aluminium ? (1 point)

b = 0,2863 nm

Calculs et justifications :

Dans un métal, dont les atomes sont de même nature, la longueur du vecteur de Burgers **b** est égale à la distance interatomique. Puisque, dans une maille CFC, les directions de plus forte densité sont les directions de la famille $\langle 110 \rangle$ (diagonales des faces du cube, voir question 2a ci-dessus), les atomes se touchent selon ces directions.

La distance interatomique – donc la longueur du vecteur de Burgers – est égale à $a\sqrt{2}/2$ où a est le paramètre de la maille. Avec $a = 0,4049$ nm, on obtient ainsi la valeur de $|b| = 0,2863$ nm.

On constate l'apparition du glissement cristallographique dans les systèmes activés pour une contrainte nominale de traction σ_{nom} égale à 1,96 MPa.

- e) Que se passe-t-il physiquement dans le monocristal quand le glissement cristallographique irréversible apparaît ? (1 point)

Réponse :

Il y a mise en mouvement (déplacement) des dislocations dans les systèmes de glissement activés.

- f) Quelle est la cission critique τ^* (en MPa) caractéristique du glissement cristallographique dans l'aluminium de haute pureté ? (1 point)

$\tau^* = 0,80$ MPa

Calculs et justifications :

Le facteur de Schmid selon les directions $[011]$ et $[\bar{1}01]$ étant le même, le glissement sera également activé dans ces deux systèmes (voir la question 2c) ci-dessus). En appliquant la loi de Schmid à ces systèmes de glissement, on obtient la cission critique de mise en mouvement des dislocations dans l'aluminium:

$$\tau^* = \sigma_{nom} \cos\theta \cos\chi = (1,96 \text{ MPa}) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = 0,80 \text{ MPa}$$

- g) Quelle devrait être la valeur de la limite proportionnelle d'élasticité R_e (en MPa) de l'aluminium polycristallin, déduite de l'essai de traction d'un monocristal d'aluminium de haute pureté ? (0,5 point)

$R_e =$ **1,6** **MPa**

Calculs et justifications :

La limite proportionnelle théorique d'élasticité R_e d'un polycristal, déduite de la cission critique τ^* obtenue sur le monocristal, est donnée par la relation suivante : $R_e \approx 2 \tau^*$

En fait, on constate que l'aluminium polycristallin commercialement pur (teneur en Al = 99,8 % poids) présente une limite proportionnelle d'élasticité R_e égale 18 MPa.

- h) Citez deux raisons qui expliquent la différence des valeurs de la limite proportionnelle d'élasticité R_e de l'aluminium polycristallin, soit celle déduite des essais de traction sur un monocristal soit celle directement mesurée sur un aluminium polycristallin. *Justifiez votre réponse.* (2 points)

Réponse :

Durcissement par solution solide (de substitution ou d'insertion) de l'aluminium commercial polycristallin qui contient plus d'impuretés que le monocristal de haute pureté.

Durcissement par affinement des grains de l'aluminium commercial polycristallin, qui n'est pas pris en compte par la relation $R_e \approx 2 \tau^*$ déduite du comportement du monocristal. Cette relation suppose que le polycristal n'est, en fait, qu'un monocristal où se produira toujours un glissement dans un système ayant un facteur de Schmid égal à 0,5. Elle ignore la présence des joints de grains qui sont des obstacles au mouvement des dislocations.

Question n° 3

Ténacité

(3 points)

Une pièce d'avion est fabriquée à partir d'un alliage d'aluminium 7075-T651 dont le facteur critique d'intensité de contrainte et la limite conventionnelle d'élasticité sont respectivement de $24 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ et de 495 MPa. On a déterminé que la rupture se produit sous une contrainte de 175 MPa lorsque la pièce contient une fissure interne dont la longueur est de 2,00 mm. On suppose que le facteur géométrique associé à une fissure interne ne change pas pour les longueurs de fissure interne considérées dans ce problème.

- a) Est-ce qu'une pièce absolument identique va se rompre lorsqu'elle sera exposée à une contrainte de 250 MPa si la longueur maximale d'une fissure interne est de 1,00 mm ? Dites pourquoi ? (2 points)

Rupture (oui ou non) : **OUI**

Calculs et justifications :

On trouve la valeur du facteur géométrique α associé aux fissures internes en appliquant l'équation nous donnant le facteur d'intensité de contrainte K : $K = \alpha\sigma\sqrt{\pi a}$

On nous indique qu'on a une rupture de la pièce sous une contrainte de 175 MPa – inférieure à $R_{e0,2}$ – et une longueur de fissure de 2,00 mm. Avec un $K_{IC} = 24 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$, on a :

$$\alpha = \frac{K_{IC}}{\sigma\sqrt{\pi a}} = \frac{24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}{(175 \text{ MPa})\sqrt{\pi(2,00 \times 10^{-3} \text{ m})}} = 1,73$$

En calculant le facteur d'intensité de contrainte associé à une fissure interne de 1,00 mm sous une contrainte de 250 MPa qui est inférieure à $R_{e0,2}$, on a :

$$K = (1,73)(250 \text{ MPa})\sqrt{\pi(1,00 \times 10^{-3} \text{ m})} > K_{IC}.$$

Donc, il y aura rupture brutale de la pièce.

- b) Y aura-t-il une déformation plastique généralisée dans une autre pièce absolument identique qui contient une fissure interne de longueur maximale de 2,50 mm si on applique une contrainte suffisante pour rompre la pièce ? *Justifiez votre réponse par des calculs appropriés.* (1 point)

Déformation plastique généralisée (**oui** ou **non**) : **NON**

Calculs et justifications :

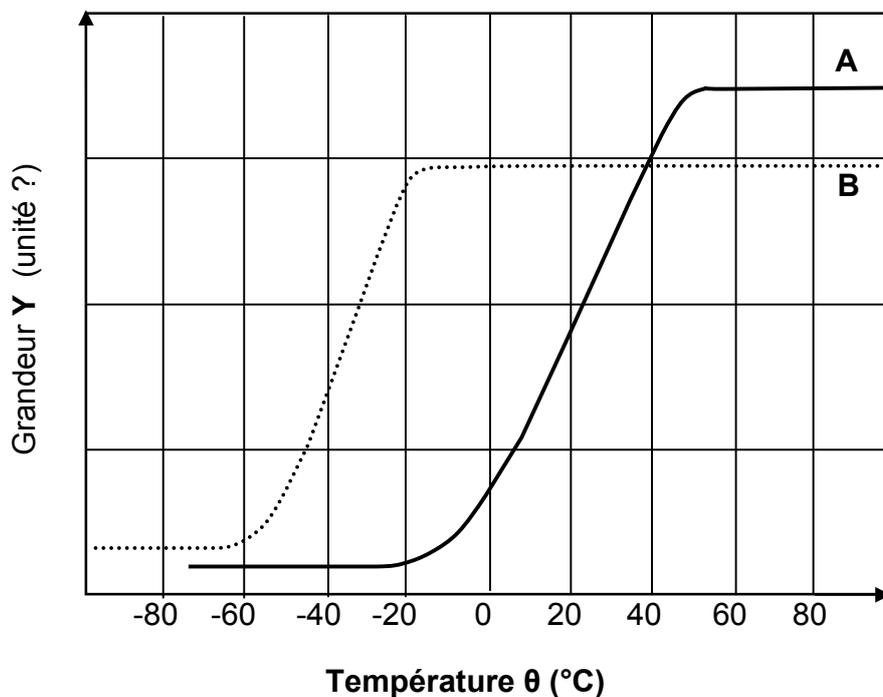
Une pièce qui a un défaut de 2,50 mm, caractérisé par un facteur géométrique de 1,73 se rompra sous une contrainte de :

$$\sigma = \frac{K_{IC}}{\alpha\sqrt{\pi a}} = \frac{24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}{(1,73)\sqrt{\pi(2,5 \times 10^{-3} \text{ m})}} = 156,5 \text{ MPa}$$

qui est inférieure à la limite d'élasticité du matériau dont est constitué la pièce. Donc, il n'y aura pas de déformation plastique généralisée de la pièce avant sa rupture.

Question N°4 Transition ductile-fragile (8 points)

La figure ci-contre représente les courbes caractéristiques obtenues au cours d'essais de résilience Charpy réalisés sur deux matériaux **A** et **B**.



- a) Quelle est la grandeur **Y** portée en ordonnée sur la figure ci-contre et en quelle(s) unité(s) est exprimée cette grandeur ? *Justifiez votre réponse.* (1 point)

Grandeur **Y** : énergie

unités : joules

- b) Quel matériau, **A** ou **B**, est le moins tenace à la température ambiante ? (0,5 point)

Matériau (**A** ou **B**) : **A**

- c) Si la vitesse de sollicitation de l'essai Charpy était augmentée, dans quel sens (vers la **Gauche** ou vers la **Droite**) seraient déplacées les courbes de résilience ? *Justifiez votre réponse.* (1 point)

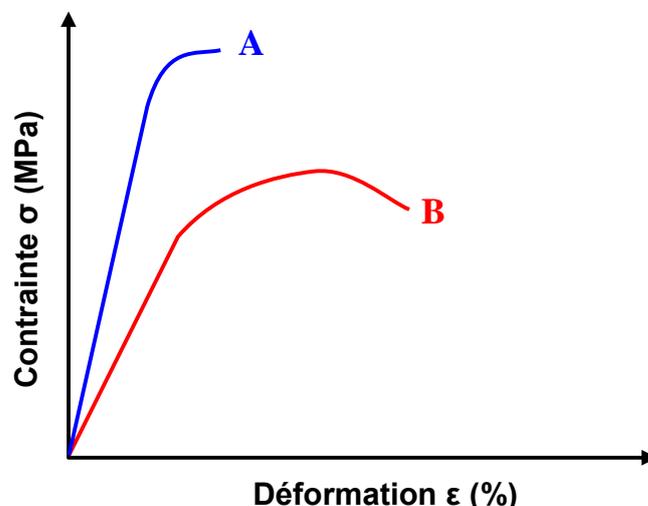
sens (**G** ou **D**) : **D**

Justifications :

Une augmentation de la vitesse de sollicitation ne permet pas au matériau de présenter plus de ductilité, au contraire, il devient plus fragile. Les dislocations ne sont pas suffisamment mobiles pour accommoder le taux de déformation auquel le matériau est soumis.

Donc cette augmentation de la vitesse de sollicitation entraîne une augmentation de la température de transition « Ductile – Fragile », c.-à-d. un déplacement des courbes de résilience vers la droite (plus hautes températures).

- d) Sachant que la rigidité du matériau **A** est supérieure à celle du matériau **B**, tracez schématiquement la courbe de traction de chacun des matériaux si l'essai de traction est réalisé à une température $\theta = -20^{\circ}\text{C}$. *Identifiez clairement chaque courbe.* (2 points)



- e) En utilisant le code de réponses proposé ci-dessous, classez les deux matériaux, par ordre de mérite, selon la propriété que l'on considère à une température donnée. (2,5 points)

| code numérique | signification |
|----------------|---|
| 1 | A > B : le matériau A a une « propriété » supérieure à celle du matériau B. |
| 2 | A < B : le matériau A a une « propriété » inférieure à celle du matériau B. |
| 3 | A = B : le matériau A a une « propriété » égale à celle du matériau B. |
| 4 | I (indéterminé) |

où **A** ou **B** représente le matériau et « propriété » est la propriété considérée.

| température (°C) | propriété | code numérique * |
|------------------|--------------------------|------------------|
| - 70 | résilience | 2 |
| | limite d'élasticité | 4 |
| + 60 | résilience | 1 |
| | résistance à la traction | 4 |
| - 10 | ductilité | 4 |

* Seules les réponses en chiffres seront corrigées.

- f) Quel matériau, **A** ou **B**, a la température de transition ductile-fragile la plus faible ? Justifiez votre réponse en indiquant le critère que vous avez utilisé dans la détermination des températures de transition ductile-fragile de chaque matériau. (1 point)

matériau (**A** ou **B**) : **B**

Justifications :

On remarque que les courbes de résilience des matériaux A et B présentent des plateaux fragiles à basse température où l'énergie nécessaire à la rupture, W_f , est faible et des plateaux ductiles où l'énergie nécessaire à la rupture, W_d , est élevée.

Un choix judicieux du critère de détermination de la température de transition ductile-fragile (TTDF) est la température à laquelle on atteint le niveau moyen des énergies de rupture W_f et W_d . C'est-à-dire :

$$\bar{W} = \frac{(W_f + W_d)}{2}$$

En observant les courbes de résilience des matériaux A et B, on constate que :

$$(TTDF)_B < (TTDF)_A$$

Formulaire général :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$R_{th} = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{a_0}}$$

$$l = \frac{hx}{na} + \frac{ky}{nb} + \frac{lz}{nc}$$

$$\mathbf{r} = u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c}$$

$$\sigma_y = \sigma_{nom} \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{r}} \right)$$

$$\tau = \frac{F}{S_0} \cos\theta \cos\chi$$

$$\tau_{th} = \frac{G}{2\pi} \frac{b}{a}$$

$$R_{e0.2} = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

$$l_c = a^* = \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2}$$

$$K_C = \alpha \sigma_{nom} \sqrt{\pi a}$$