

Identification de l'étudiant(e)				Réservé
Nom :		Prénom :		Q1 /10
Signature :		Matricule :	Groupe :	Q2 /9
Sigle et titre du cours		Groupe	Trimestre	Q3 /11
MTR2000 Matériaux métalliques		Tous	Automne 2012	Q4 /11
Professeurs		Local	Téléphone	Q5 /9
Yves Verreman Richard Lacroix		A-460 A-476	4044 4771	/50
Jour	Date	Durée	Heures	
Jeudi	18 octobre 2012	2 h 30	18 h 30 – 21 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 50 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. Vous avez, en annexe, le formulaire général. Vous pouvez détacher cette page du questionnaire.				
Important	Cet examen contient <input type="text" value="5"/> questions sur un total de <input type="text" value="14"/> pages. (excluant cette page)			
	La pondération de cet examen est de <input type="text" value="50"/> %			
	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

Essai de traction

(10 points)

Le premier graphique qui suit (figure 1) montre l'enregistrement de la charge **F** en fonction de l'allongement absolu $\Delta l = l - l_0$, obtenu lors d'un essai de traction sur une éprouvette cylindrique faite d'un acier inoxydable de haute résistance. Le deuxième graphique (figure 2) agrandit l'échelle en abscisse pour les faibles allongements.

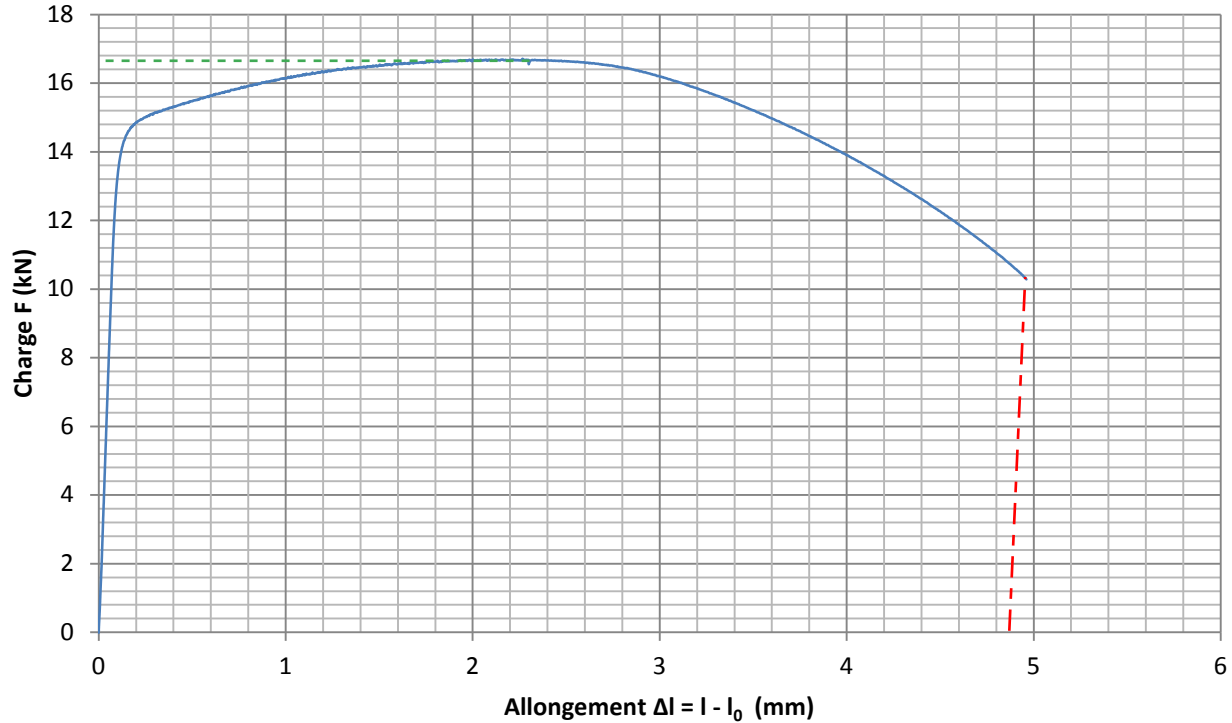


Figure 1 : Courbe brute de traction d'un acier inoxydable.

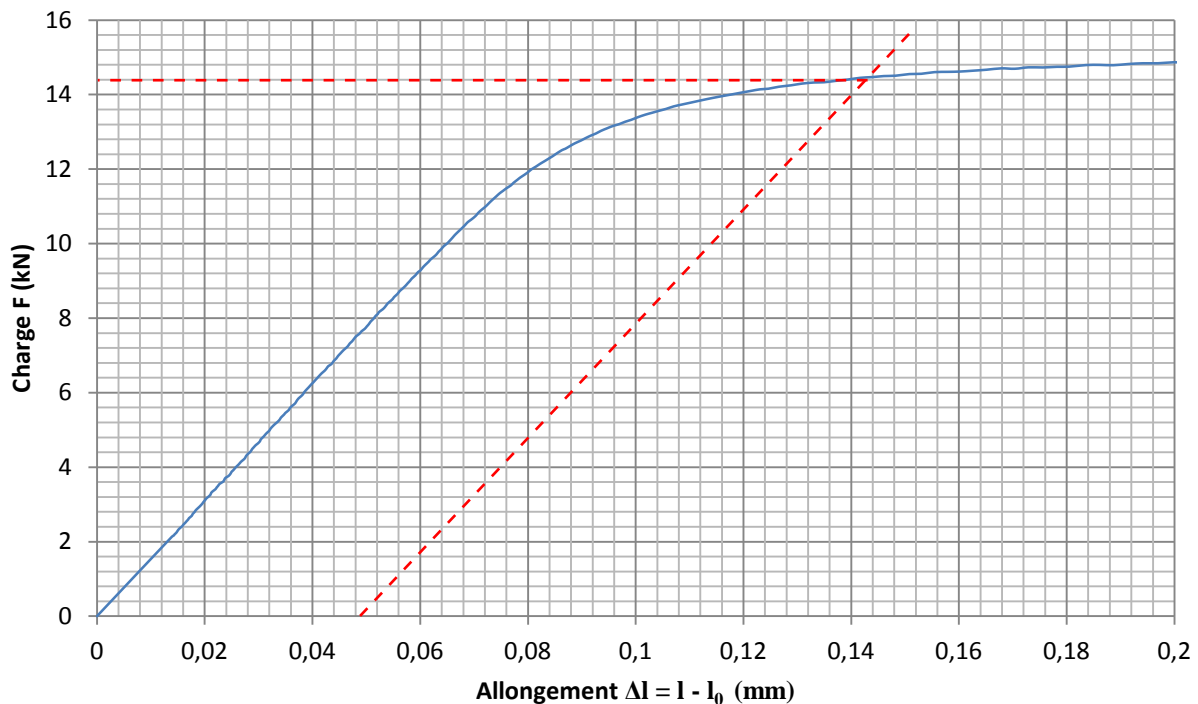


Figure 2 : Agrandissement de la figure 1 pour de faibles allongements.

Avec des instruments précis, on a mesuré la longueur utile de l'éprouvette $l_0 = 24,595 \text{ mm}$ et son diamètre $d_0 = 5,018 \text{ mm}$.

En utilisant les symboles et les unités usuelles et en indiquant les unités après chaque résultat numérique, déterminez les propriétés mécaniques suivantes de l'acier :

a) Son module d'Young. (1,5 point)

Résultat : $E = 191 \text{ GPa}$

Calculs :

En prenant un point sur le segment droit de la courbe brute de traction (figure 2) : (0,06 mm, 9,2 kN); on trouve :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fl_0}{S_0(\Delta l)} = \frac{4Fl_0}{\pi d_0^2(\Delta l)} = \frac{4(9,2 \times 10^3 \text{ N})(24,595 \times 10^{-3} \text{ m})}{\pi(5,018 \times 10^{-3} \text{ m})^2(0,06 \times 10^{-3} \text{ m})} = 190,7 \text{ GPa}$$

b) Sa limite d'élasticité à 0,2% de déformation plastique. (1,5 point)

Résultat : $R_{e0,2} = 728 \text{ MPa}$

Calculs :

En traçant une droite parallèle au segment droit de la courbe brute de traction (lignes en tirets rouges sur la figure 2) pour un allongement Δl_p correspondant à une déformation de 0,2%, on a :

$$\Delta l_p = \varepsilon_p l_0 = (2 \times 10^{-3})(24,595 \text{ mm}) = 0,0492 \text{ mm}$$

L'intersection de cette droite avec la courbe brute de traction donne la charge $F_{e0,2}$ pour laquelle on a 0,2% de déformation plastique :

$$F_{e0,2} = 14,4 \text{ kN}$$

et :

$$R_{e0,2} = \frac{F_{e0,2}}{S_0} = \frac{4F_{e0,2}}{\pi d_0^2} = \frac{4(14,4 \times 10^3 \text{ N})}{\pi(5,018 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 728 \text{ MPa}$$

- c) Sa résistance à la traction. (1,5 point)

Résultat : $R_m = 844 \text{ MPa}$

Calculs :

Le point maximum de la courbe brute de traction (lignes en tirets verts sur la figure 1) est atteint pour $F_{max} = 16,7 \text{ kN}$. Alors :

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} = \frac{4F_{max}}{\pi d_0^2} = \frac{4(16,7 \times 10^3 \text{ N})}{\pi(5,018 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 844 \text{ MPa}$$

- d) Son allongement à la rupture. (1,5 point)

Résultat : $A\% = 19,9 \%$

Calculs :

L'allongement permanent à la rupture, $\Delta l_{p, rupture}$, où on tient compte du retour élastique (lignes en tirets rouges sur la figure 1) est de : $\Delta l_{p, rupture} = 4,9 \text{ mm}$. Alors :

$$A\% = \frac{\Delta l_{p, rupture}}{l_0} = \frac{(4,9 \times 10^{-3} \text{ m})}{(24,595 \times 10^{-3} \text{ m})} = 19,92\%$$

- e) Indiquez en quel point de la courbe de traction le matériau a emmagasiné la plus grande énergie de déformation élastique. Calculez cette énergie en MJ/m^3 . (2 points)

Coordonnées du point sur la courbe brute de traction :	$\Delta l =$	2,25	mm	$F =$	16,7	kN
--	--------------	-------------	----	-------	-------------	----

Résultat :	$W_{él} =$	1,865	MJ/m^3
------------	------------	--------------	-----------------

Calculs :

L'énergie élastique emmagasinée par unité de volume à $F_{max} = 16,7 \text{ kN}$ est : $W_{él} = \frac{\sigma^2}{2E}$ où $\sigma = R_m = 844 \text{ MPa}$ (voir 1 c) et $E = 191 \text{ GPa}$ (voir 1 a).

Alors :

$$W_{él} = \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{(844 \times 10^6 \text{ Pa})^2}{2(191 \times 10^9 \text{ Pa})} = 1,865 \times 10^6 \text{ J/m}^3$$

- f) Si on suppose que le coefficient de Poisson du matériau ν est égal à 0,293, quelle est la variation absolue du diamètre de l'éprouvette, $\Delta d = d - d_0$, quand la charge appliquée est de 8 kN ? (2 points)

Résultat : $\Delta d = 0,0031 \text{ mm}$

Calculs :

L'éprouvette est encore en déformation élastique sous une charge de 8 kN (voir figure 2).

Pour les déformations élastiques, on a : $\nu = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l}$ où $\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0} \\ \varepsilon_l = \frac{\sigma}{E} = \frac{4F}{\pi d_0^2 E} \end{array} \right.$

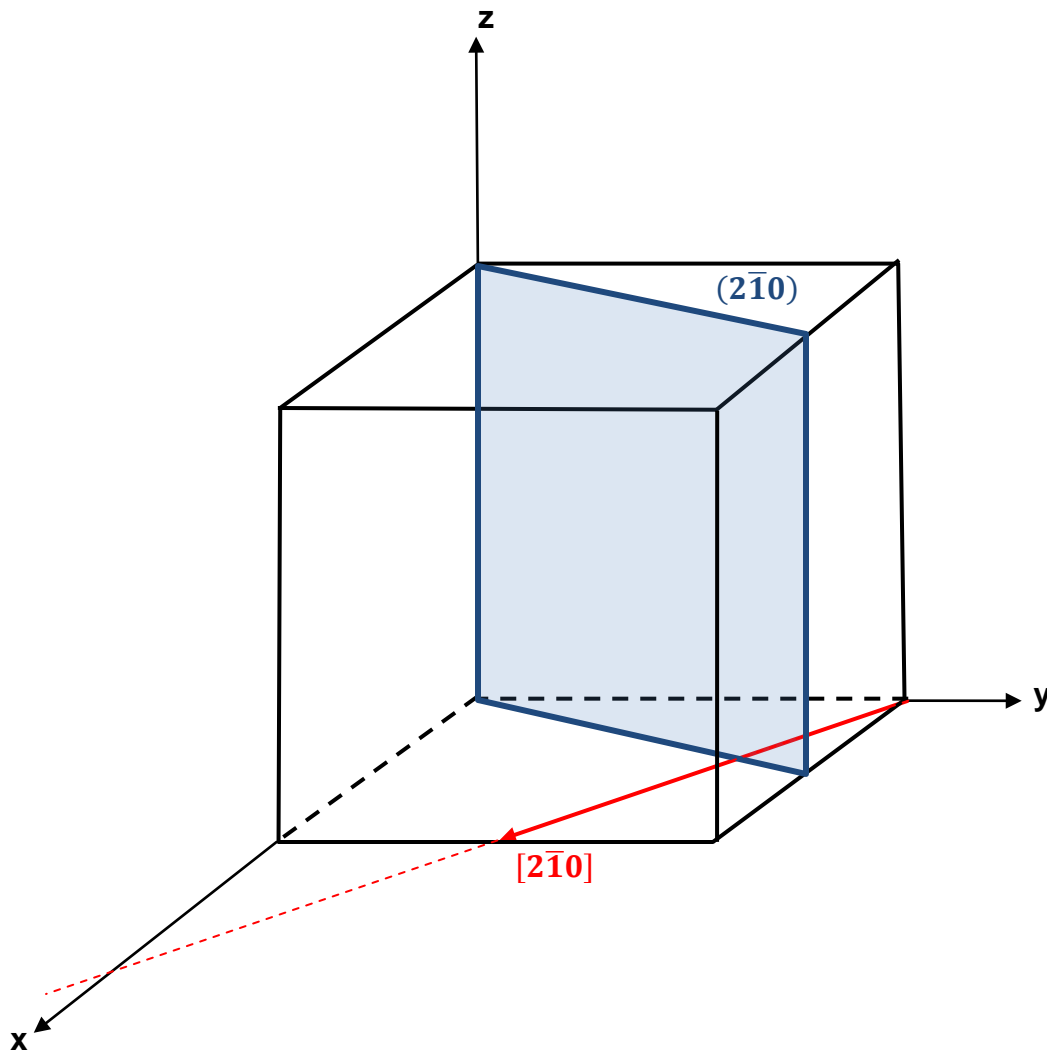
$$\text{Alors : } \Delta d = -\frac{4\nu F}{\pi d_0^2 E} = -\frac{4(0,293)(8 \times 10^3 \text{ N})}{\pi(5,018 \times 10^{-3} \text{ m})(191 \times 10^9 \text{ N/m}^2)} = 3,1 \times 10^{-6} \text{ m} = 0,0031 \text{ mm}$$

Question N°2

Cristallographie

(9 points)

- a) Dessinez à l'intérieur de la maille élémentaire cubique ci-dessous : la direction cristallographique $[2\bar{1}0]$ et le plan cristallographique $(2\bar{1}0)$. (2 points)



- b) Quelle relation géométrique y a-t-il entre la direction $[2\bar{1}0]$ et le plan $(2\bar{1}0)$? (1 point)

Réponse :

La direction $[2\bar{1}0]$ est perpendiculaire au plan $(2\bar{1}0)$.

- c) Pour un paramètre de maille a donné, calculez pour les deux systèmes cubique centré et cubique à faces centrées : la densité de nœuds selon la direction $[2\bar{1}0]$ et la densité de nœuds dans le plan $(2\bar{1}0)$ en fonction de a . (6 points)

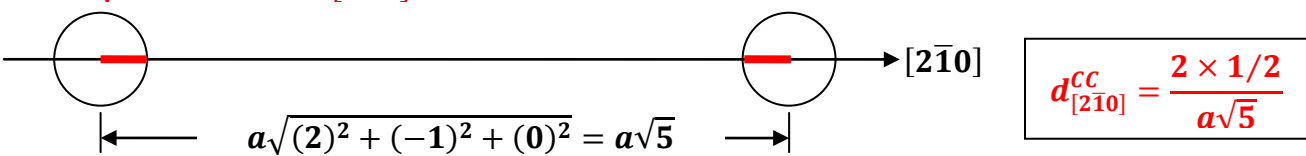
Résultats :

Densité de nœuds	cubique centré	cubique à faces centrées
direction $[2\bar{1}0]$	$\frac{1}{a\sqrt{5}}$	$\frac{1}{a\sqrt{5}}$
plan $(2\bar{1}0)$	$\frac{1}{a^2\sqrt{5}}$	$\frac{2}{a^2\sqrt{5}}$

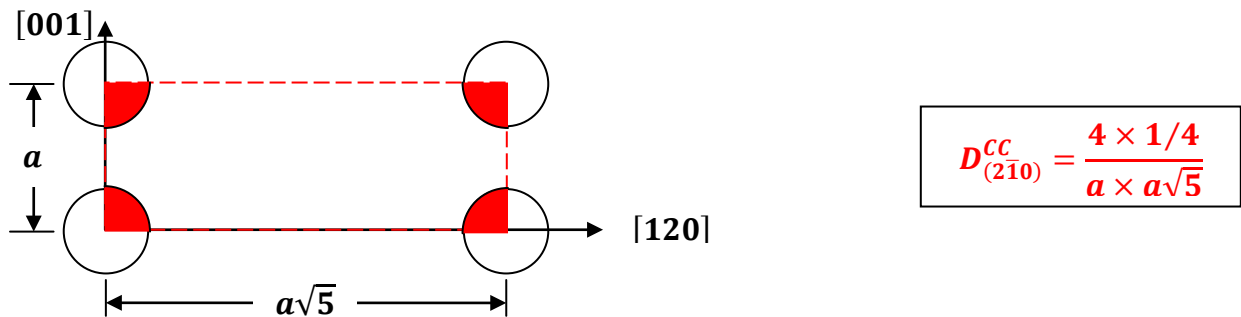
Calculs :

Pour le réseau de Bravais cubique centré, on a :

- pour la direction $[2\bar{1}0]$:

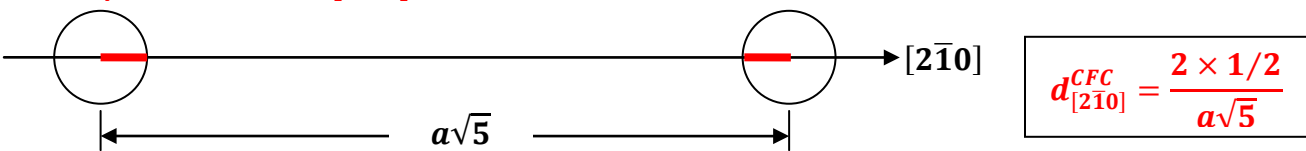


- pour le plan $(2\bar{1}0)$:

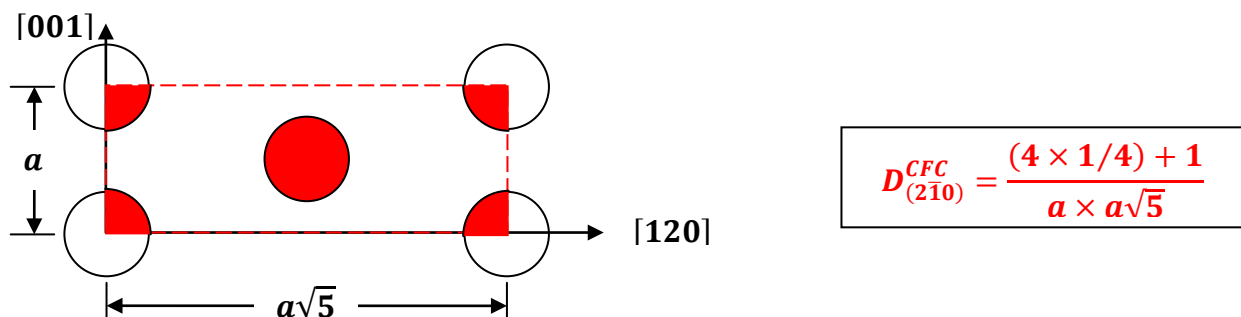


Pour le réseau de Bravais cubique à faces centrées, on a :

- pour la direction $[2\bar{1}0]$:



- pour le plan $(2\bar{1}0)$:



Question N°3**Durcissement de l'aluminium****(11 points)**

La valeur de la cission critique de glissement dans un monocristal fait d'aluminium de très haute pureté est $\tau^* = 0,79$ MPa. Les résultats d'un essai de traction et d'une étude métallographique faits sur un échantillon polycristallin du même aluminium montrent que la limite proportionnelle d'élasticité est de 16 MPa et que la taille moyenne des grains est de 10 μm .

- a) Quelle est la valeur de la cission critique de glissement dans le polycristal τ^* ? (1 point)

Réponse :

Sachant que $R_e = 2 \tau^*$, on a $\tau^* = 8$ MPa dans le polycristal.

- b) Comment expliquer l'écart entre les valeurs de τ^* du monocristal et du polycristal ? Les deux matériaux n'avaient pas été déformés avant les essais. (2 points)

Réponse :

On est en présence d'un durcissement dû aux obstacles au déplacement des dislocations que constituent les joints de grains : durcissement par affinement des grains.

Les tableaux 1 et 2 donnent la composition chimique et certaines propriétés d'un alliage commercial d'aluminium 1060 non déformé (état mou) et après une déformation plastique à froid (état demi-dur).

Tableau 1 : Composition chimique de l'alliage d'aluminium 1060

Élément	Al	Fe	Si
Teneur massique	99,6 %	0,25 %	0,15 %

Tableau 2 : Propriétés mécaniques et taille moyenne des grains de l'alliage d'aluminium 1060

État	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Taille moyenne des grains (μm)
Mou (non déformé)	28	70	40	10
Demi-dur	90	110	12	10

- c) Comment expliquer la différence de limite d'élasticité entre l'alliage d'aluminium 1060 non déformé et l'aluminium polycristallin dont il était question en a) et b) ? (2 points)

Réponse :

L'échantillon polycristallin fait d'aluminium de très haute pureté et dont la taille moyenne de grains est de 10 μm a une limite d'élasticité $R_e = 16$ MPa. Un échantillon d'aluminium 1060 polycristallin et dont la taille moyenne de grains est de 10 μm a une limite d'élasticité $R_e = 28$ MPa. Ici le durcissement est dû à la présence d'éléments en solution dans l'aluminium 1060, Fe et Si, qui entravent davantage le déplacement des dislocations : durcissement par solution solide.

- d) Comment expliquer la différence de limite d'élasticité entre l'alliage d'aluminium 1060 à l'état mou et le même alliage à l'état demi-dur ? (2 points)

Réponse :

On a la même composition chimique et la même taille de grains. Pourtant, à l'état mou (non déformé), la limite d'élasticité R_e de l'alliage est de 28 MPa et à l'état demi-dur (après avoir subi une déformation plastique à froid) elle est de 90 MPa. Il s'agit ici d'un durcissement par écrouissage.

- e) Quelle est l'origine de l'écrouissage ? (1 point)

Réponse :

L'écrouissage est le durcissement par déformation plastique à froid où les dislocations se multiplient et s'entravent entre elles, entraînant une augmentation de la cission critique de glissement et, par le fait même, une augmentation de la limite d'élasticité.

- f) Dans quel état, mou ou demi-dur, l'alliage d'aluminium 1060 devrait présenter la plus grande énergie de déformation plastique à la rupture lors d'un essai de traction ? Expliquez pourquoi en faisant les calculs appropriés (on peut négliger ici la partie de l'énergie dépensée pendant la striction). (3 points)

Réponse : A l'état mou.

Calculs :

On peut estimer approximativement l'aire sous la courbe de traction par :

$$W_p \cong \frac{A}{2} (R_{e0,2} + R_m)$$

à l'état mou : $W_{p, \text{mou}} \cong \frac{0,40}{2} (28 \text{ MPa} + 70 \text{ MPa}) = 19,6 \text{ MJ}/\text{m}^3$

à l'état demi-dur : $W_{p, \text{demi-dur}} \cong \frac{0,12}{2} (90 \text{ MPa} + 110 \text{ MPa}) = 12 \text{ MJ}/\text{m}^3$

L'aluminium 1060 a une plus grande énergie à la rupture à l'état mou qu'à l'état demi-dur.

Question N°4**Ténacité****(11 points)**

a) Quelle est la définition de la ténacité d'un matériau ?

(1 point)

Réponse :

La ténacité est la résistance d'un matériau à la propagation d'un défaut ou d'une fissure macroscopique, propagation qui peut entraîner la rupture brutale d'une pièce en service.

b) Pourquoi la ténacité des matériaux ductiles est-elle souvent bien supérieure à celle des matériaux fragiles ?

(2 points)

Réponse :

Parce qu'il y a modification des conditions énergétique et mécanique de la rupture à cause de la plastification en fond de fissure.

(Le bilan énergétique est modifié car l'énergie élastique libérée doit compenser l'énergie de surface plus l'énergie de déformation plastique ce qui a pour effet d'augmenter la contrainte requise pour satisfaire la condition énergétique.

De plus, la condition mécanique est plus difficile à atteindre à cause de l'émoussement en fond de fissure. La contrainte critique pour satisfaire la condition mécanique en est d'autant augmentée.)

c) Quel phénomène se produit au cours de la propagation d'une fissure dans un matériau ductile ?

(1 point)

Réponse :

Un sillage plastifié se forme lors de la propagation de la fissure.

d) Quelle est la quantité mesurée lors d'un essai de ténacité Charpy ?

(1 point)

Réponse :

La hauteur de remontée du mouton-pendule donne l'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette Charpy.

e) Pourquoi préfère-t-on déterminer la température de transition ductile-fragile avec l'essai Charpy plutôt qu'avec l'essai de traction ?

(1 point)

Réponse :

Parce que les conditions de sollicitations sont plus sévères et permettent de tenir compte de l'effet d'une mise en charge rapide ainsi que de l'effet d'entaille.

f) Pourquoi préfère-t-on faire un essai ténacité K_c plutôt qu'un essai Charpy pour calculer la résistance d'une pièce en service fissurée ?

(2 points)

Réponse :

Les essais Charpy permettent de comparer les matériaux entre eux tandis que les essais de ténacité K_c fournissent un facteur d'intensité de contrainte critique, fonction du matériau seulement, qui est utilisé dans le calcul des pièces en service. De plus, les essais K_c se font à partir d'une fissure très aiguë (obtenue par fatigue) représentative des conditions en service.

g) Quelle est l'unité de mesure de la ténacité K_c ?

(1 point)

Réponse : L'unité de la ténacité K_c est le $MPa\sqrt{m}$.

- h) Pour un matériau donné, pourquoi la ténacité K_c ne caractérise plus la résistance d'une pièce en service en deçà d'une certaine longueur de fissure ? (2 points)

Réponse :

Parce qu'il y a déformation plastique généralisée de la pièce dans le cas où la longueur de la fissure est inférieure à la taille de défaut critique a_0 .

Question N°5

Fatigue-propagation

(9 points)

Une pièce en service fissurée est sujette à une force de traction cyclique (ou de traction-compression cyclique) variant d'une valeur maximale F_{max} à une valeur minimale F_{min} . Les dimensions de la section rectangulaire sont $W = 20$ mm et $e = 10$ mm. La profondeur de la fissure est $a = 5$ mm. Le premier graphique ci-dessous (figure 3) donne le facteur de correction géométrique α dans l'expression du facteur d'intensité de contrainte K de la fissure. La figure 4 donne les résultats d'essais de fatigue-propagation effectués en laboratoire sur le matériau constitutif de la pièce (acier 4340 à haute résistance; $R_m = 1296$ MPa).

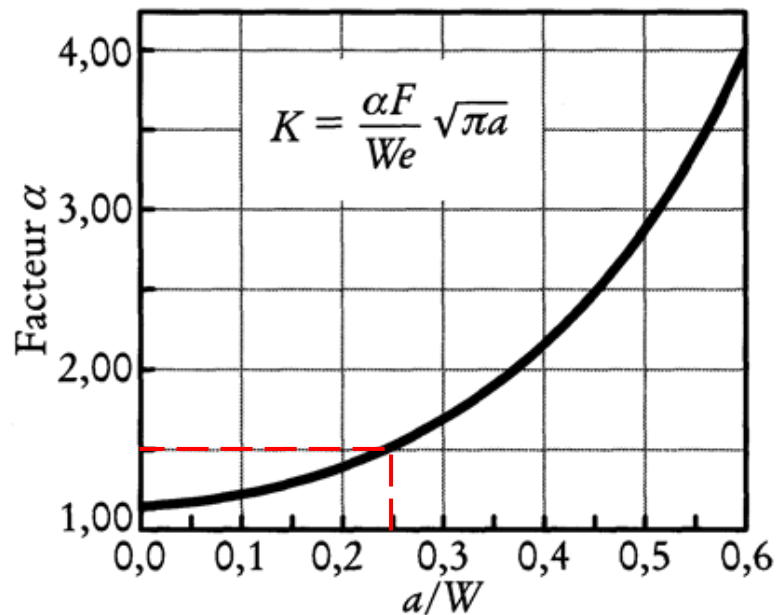
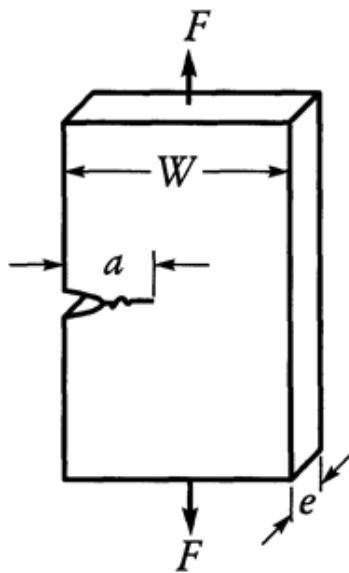


Figure 3 : Pièce fissurée et facteur de correction α en fonction de a/W .

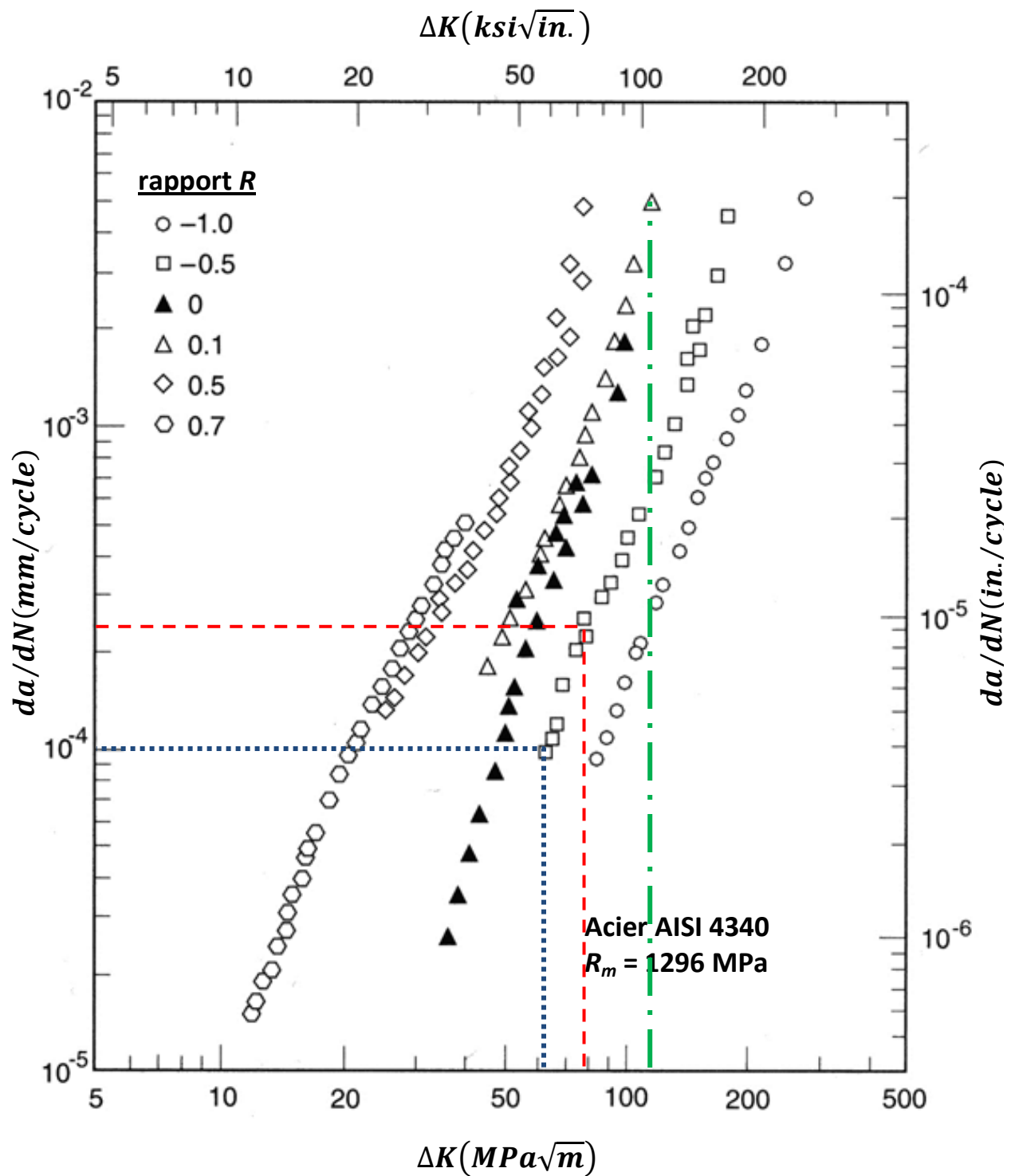


Figure 4 : Vitesse de propagation de fissure da/dN en fonction de la variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK .

- a) Dans le cas où $F_{max} = + 56 \text{ kN}$ et $F_{min} = - 28 \text{ kN}$, déterminez le rapport de contrainte R et évaluez à quelle vitesse la fissure se propagera. (3 points)

Résultats :

$$R = -0,5$$

$$da/dN = 2,5 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$$

Calculs :

Comme la section de la pièce sollicitée est la même à $F_{max} = + 56 \text{ kN}$ et $F_{min} = - 28 \text{ kN}$, alors :

$$R = \frac{F_{min}}{F_{max}} = \frac{-28 \text{ kN}}{56 \text{ kN}} = -0,5$$

De plus, à l'aide de la figure 3, on détermine α . Lorsque $a/W = 5 \text{ mm}/20 \text{ mm} = 0,25$ alors $\alpha = 1,5$.

$$\text{et } \Delta K = \frac{\alpha(\Delta F)}{W_e} \sqrt{\pi a} = \frac{(1,5)(56 \times 10^3 \text{ N} - (-28 \times 10^3 \text{ N}))}{(20 \times 10^{-3} \text{ m})(10 \times 10^{-3} \text{ m})} \sqrt{\pi(5 \times 10^{-3} \text{ m})} = 79 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Une lecture sur la figure 4 pour un rapport $R = - 0,5$ (carrés blancs) et pour une variation du facteur d'intensité de contrainte $\Delta K = 79 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (ligne en tirets rouges) nous donne une vitesse d'avancée de la fissure $\frac{da}{dN} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$

- b) Pour le même chargement, advenant le cas où on peut augmenter l'épaisseur e de la pièce, quelle valeur minimale devrait-elle avoir pour que la fissure ne se propage pas plus vite qu'à 10^{-4} mm/cycle ? (3 points)

Résultat : $e_{min} = 13 \text{ mm}$

Calculs :

Pour un rapport de contrainte $R = -0,5$ et une vitesse d'avancée de fissure $\frac{da}{dN} = 10^{-4} \text{ mm/cycle}$, on a une variation du facteur d'intensité de contrainte $\Delta K = 62 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (ligne en pointillés bleus).

Comme $\Delta K = \frac{\alpha(\Delta F)}{W_e} \sqrt{\pi a}$, on a, pour les mêmes conditions de chargement :

$$e = \frac{\alpha(\Delta F)}{W(\Delta K)} \sqrt{\pi a} = \frac{(1,5)(56 \times 10^3 \text{ N} - (-28 \times 10^3 \text{ N}))}{(20 \times 10^{-3} \text{ m})(62 \times 10^6 \text{ N/m}^{3/2})} \sqrt{\pi(5 \times 10^{-3} \text{ m})} \cong 1,3 \times 10^{-2} \text{ m}$$

- c) Pour un rapport de contrainte $R = 0,1$ et pour la même épaisseur qu'à la question a), quelle valeur la force maximale F_{max} ne doit pas dépasser pour éviter toute propagation brutale de la fissure à travers la pièce ? (3 points)

Résultat : $F_{max} = 140 \text{ kN}$

Calculs :

Pour un rapport de contrainte $R = 0,1$, on a une variation du facteur d'intensité de contrainte à la rupture $\Delta K = 120 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (ligne en tiret-point verts).

Sachant que : $R = \frac{F_{min}}{F_{max}}$ et que $\Delta F = F_{max} - F_{min}$, alors : $\Delta F = F_{max}(1 - R)$

Étant donné que $\Delta K = \frac{\alpha(\Delta F)}{We} \sqrt{\pi a}$, on a :

$$F_{max} = \frac{(\Delta K)We}{(1 - R)\alpha\sqrt{\pi a}} = \frac{(120 \times 10^6 \text{ N/m}^{3/2})(20 \times 10^{-3} \text{ m})(10 \times 10^{-3} \text{ m})}{(1 - 0,1)(1,5)\sqrt{\pi(5 \times 10^{-3} \text{ m})}}$$

$$F_{max} \cong 140 \text{ kN}$$

Formulaire général

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

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

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

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

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

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

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

$$a^* = \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma_{nom}^2}$$

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

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

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

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n$$

$$1 = \frac{hx}{na} + \frac{ky}{nb} + \frac{lz}{nc}$$

$$m = \frac{A_{corr}t}{nF}$$

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

$$\Delta = \frac{(m_a)_{ox} \rho_M}{(m_a)_M \rho_{ox}}$$

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$