

Série N° 7 — Semaine du 28 Octobre 2024

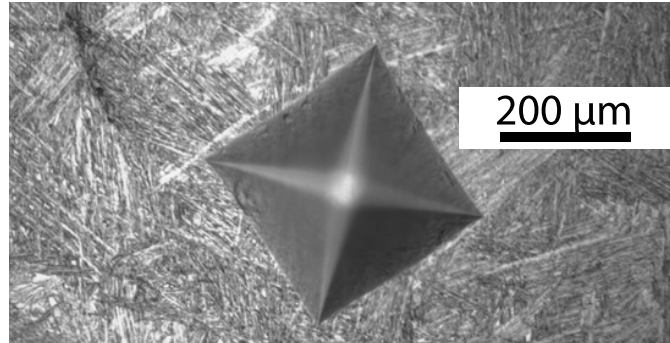
Dureté/usure/ténacité

1. Vrai ou faux ?

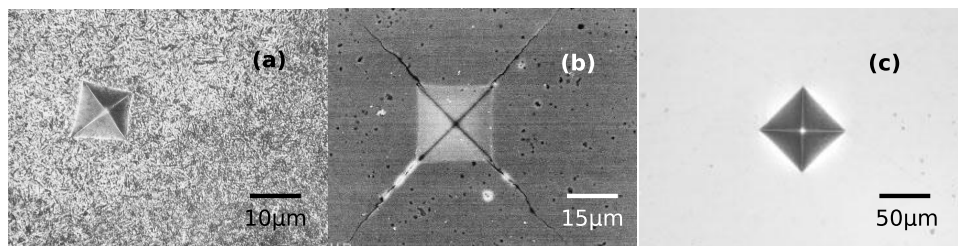
	Vrai	Faux
a. Le test de dureté permet d'évaluer rapidement et à faible coût la limite d'élasticité d'un matériau, et de différencier des lots de matière.	☐	☐
b. La dureté d'un matériau est en général environ trois fois plus grande que son module d'Young.	☐	☐
c. La ténacité d'un matériau dépend de la contrainte appliquée ou de la taille des fissures considérées.	☐	☐
d. Plus la limite d'élasticité d'un matériau ductile est faible, plus la propagation d'une fissure dans ce matériau va être limitée par la déformation plastique à la pointe de la fissure.	☐	☐
e. Au-delà d'une certaine longueur critique, une fissure dans un métal ou une céramique va pouvoir se propager quelque soit la contrainte appliquée.	☐	☐
f. Le coefficient d'usure d'Archard est un paramètre intrinsèque au matériau.	☐	☐
g. Le coefficient de frottement du Polytétrafluoroéthylène (PTFE ou Téflon) sur l'acier est environ 100 fois plus faible que celui du caoutchouc sur l'acier.	☐	☐

2. Dureté

Vous voici ingénieur(e) responsable des développements dans une petite entreprise de pièces de machines-outils. Vous recevez un lot d'acier à faible teneur en carbone avec une certification d'une dureté Brinell de 100 H_B , et un module d'élasticité de 210 GPa. Pour vérifier le lot, comme vous n'avez que cela à disposition dans votre atelier, vous faites une indentation Vickers avec une force de 98.1 N.



- a. À partir de l'empreinte ci-dessus, déterminez la dureté H_V de cet acier. Le matériau correspond-il aux spécifications ? Quelle est sa limite élastique ?
- b. Vous aidez vos collègues qui eux, travaillent dans l'entreprise voisine qui est dans le domaine spatial. Ils ont reçu un lot de saphir synthétique (Al_2O_3 , module d'élasticité $E = 345 \text{ GPa}$) qui sera utilisée sur un module de la station spatiale internationale. Le fournisseur garantit une dureté Mohs de 9. Vous confirmez cette valeur par un test d'indentation Vickers ($F = 10 \text{ N}$) sur une pièce, mais au moment de passer le résultat à l'entreprise, un de vos collègues farceur a mélangé votre photo avec d'autres. Pouvez vous retrouver, parmi les trois ci-dessous, la bonne empreinte ?



3. Ténacité, application directe du cours

Un bras de robot de section 1 cm^2 , dont on négligera la masse propre, doit pouvoir soulever verticalement une masse de 250 kg avec des accélérations de $10 g$, où g est l'accélération de la gravité (9.81 m/s^2). Il a une petite fissure transversale de 3 mm de long. Le matériau (un alliage d'aluminium) a une ténacité de $30 \text{ MPa m}^{1/2}$ et une limite élastique $\sigma_y = 400 \text{ MPa}$.

- a. Calculez la contrainte dans la section du bras (en utilisant que la somme des forces est égale à la masse fois l'accélération). À l'aide de la ténacité du matériau, calculez la contrainte critique si le matériau comporte une fissure de longueur comme indiqué ci-dessus. La fissure est-elle critique (est-ce qu'elle va se propager de manière catastrophique) ?

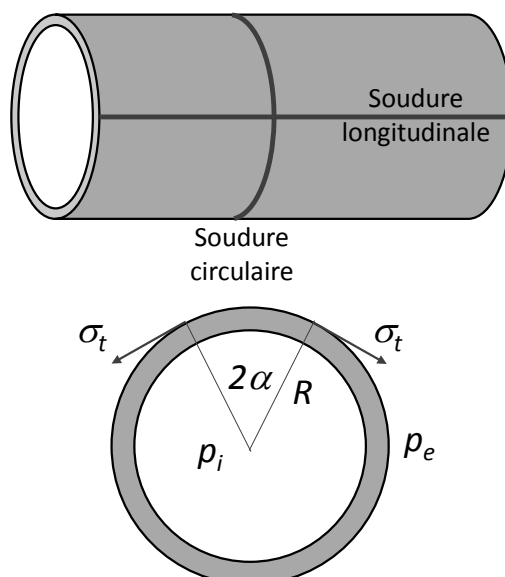
- b. Quelle est la taille de la zone déformée plastiquement en avant de la fissure ?
- c. Faudrait-il remplacer le bras si celui-ci était en alumine ($K_{Ic}=4 \text{ MPa m}^{1/2}$, $\sigma_y = 600 \text{ MPa}$) ? Quelle serait la longueur de fissure critique dans ce cas ? Et la taille de la zone déformée plastiquement en avant d'une fissure de longueur très légèrement inférieure à la longueur critique ?

4. Usure, application directe du cours

Une pièce en acier frotte contre un rail, son coefficient d'usure d'Archard k_a vaut 10^{-7} MPa^{-1} . Sa surface de contact est de 10 mm^2 et la force normale de contact est de 20 N . Quelle sera la diminution de hauteur (en microns) de cette pièce après 1 km de frottement ?

5. Ténacité des soudures dans une conduite forcée, exercice sur un cas pratique d'ingénierie

Une canalisation d'eau en acier d'une centrale hydroélectrique située à 500 m d'altitude est alimentée par un barrage situé à 2500 m d'altitude. Les tubes d'acier qui la constituent sont fabriqués de la manière suivante : dans une première étape, des tôles plates rectangulaires sont laminées à chaud de manière différentielle pour les incurver progressivement et leur imprimer le bon rayon de courbure, $R = 1 \text{ m}$. Lorsque les deux bords des plaques se touchent le long d'un axe du cylindre, on les soude longitudinalement. Les tubes sont ensuite transportés par camion jusque sur le site de la canalisation et soudés bout-à-bout à leurs voisins par des soudures circulaires. La figure ci-dessous illustre le cas de figure et indique comment les contraintes tangentielles peuvent être représentées.



- Évaluez la pression p_i à l'intérieur de la canalisation à son arrivée près de la centrale, en connaissant la hauteur de la colonne d'eau et la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3). Vous pouvez prendre $g = 10 \text{ m/s}^2$ pour simplifier.
- En faisant quelques approximations sur l'épaisseur de la paroi qui est faible par rapport au diamètre du tube, la contrainte tangentielle σ_t est donnée en fonction de la pression, du rayon R de la canalisation et de son épaisseur e , par

$$\sigma_t = (p_i - p_{\text{atm}}) \frac{R}{e}$$

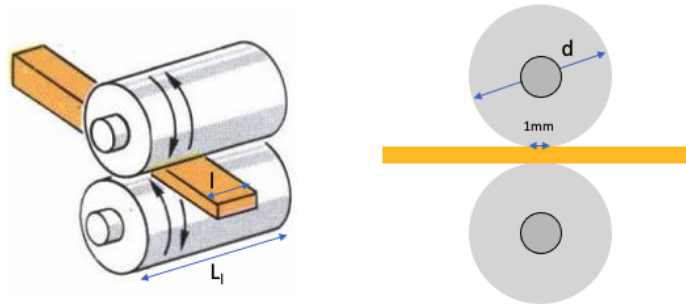
Sachant que l'acier de la paroi a une limite élastique $\sigma_Y = 400 \text{ MPa}$, quelle épaisseur de paroi devez-vous choisir pour rester dans le domaine élastique? On supposera la contrainte uniforme dans l'épaisseur de la paroi ($R \gg e$).

- Vous êtes chargé d'inspecter les soudures par ultrasons. Quelle longueur maximale de fissure longitudinale pouvez-vous tolérer, en prenant un facteur de sécurité de 2 sur la longueur par rapport à la longueur critique trouvée pour la contrainte tangentielle égale à la limite d'élasticité? (pour l'acier, $K_{IC} = 100 \cdot 10^6 \text{ Pa}\sqrt{\text{m}}$)
- Les soudures n'ont pas été très bien faites, et comme il y a eu une modification des propriétés de l'acier à cet endroit-là, la ténacité de l'acier dans la soudure est plutôt de $K_{IC} = 30 \cdot 10^6 \text{ Pa}\sqrt{\text{m}}$. Qu'en déduisez-vous, en terme de risque et de longueur maximale de fissure autorisée?

- e. Le même tube, avec la même fissure, présenterait-il le même danger si on l'utilisait pour un sous-marin plongeant à 2000 m de profondeur (pour autant que la fissure ne soit pas bien sûr traversante....) ?
- f. Question facultative : démontrez la formule donnée en b, en faisant un équilibre des forces sur un petit morceau de conduite, et quelques approximations qui permettent de simplifier.

6. Usure d'un cylindre de laminoir à chaud, exercice sur un cas pratique d'usure

Vous voici en stage dans une aciérie, dans le service du laminage à chaud des lingots d'acier pour former des tôles. Ceci est effectué par des laminoirs, qui comportent des rouleaux cylindriques en acier, entre lesquels passent les lingots chauds. Les cylindres ont un diamètre de $d=600$ mm, une longueur utile de $L_l = 1.5$ m, et la force appliquée par le rouleau sur le lingot est de $F=1$ kN. On prend l'hypothèse que la taille de la zone de contact cylindre/lingot est un rectangle de 1mm de large sur toute la largeur du lingot qui est de $l=1$ m. Le petit graphe ci-dessous vous donne une idée du système. On vous demande d'estimer, après 100km de tôle laminée, quelle sera l'usure, en mm, de la surface des cylindres, sachant que le coefficient d'usure d'Archard de l'acier dans ce cas vaut $k_a = 10^{-7}$ MPa $^{-1}$.



7. Réponses à quelques questions

- a. Exercice 2, a : Réponse : dureté 100, b : Réponse : c'est la (b)
- b. Exercice 3, a : Réponse : contrainte critique, 270 MPa, b : Réponse : 1.4mm, c : Réponse : longueur critique dans ce cas, 67 micromètres, et 14 micromètres de taille de zone plastique.
- c. Exercice 4 : Réponse : 200 micromètres

- d. Exercice 5 : a : *Réponse : 201 bars*, b : *Réponse : 5cm*, c : *Réponse : 9.95mm*, d : *Réponse : 0.89mm*
e. Exercice 6 : *Réponse : 0.0053mm.*

