

Comportement Mécanique des Matériaux

EPFL - Cours MSE 234, Section Mécanique Ba3

Examen final du 29 janvier 2024

Instructions: répondez au propre sur ces feuilles, après avoir écrit votre nom ci-dessous. Si vous avez besoin de davantage de place pour vos réponses, utilisez la dernière feuille, qui est blanche (sans oublier d'indiquer clairement sous la question posée qu'une partie de sa réponse se trouve à la fin de votre copie d'examen).

Aucun document autre que l'énoncé qui suit ne peut être consulté pendant l'examen. La réponse à l'examen est individuelle et composée sans consultation auprès d'autrui.

Votre carte Camipro ainsi que tout appareil électronique utilisé pendant l'examen doivent être contrôlés pendant l'examen ; nous vous prions donc de les avoir à disposition pour contrôle.

Si vous avez une question signalez-le en levant votre bras et sans déranger vos camarades. Si votre question est d'intérêt général elle sera écrite avec sa réponse au tableau de toutes les salles de l'examen.

Le nombre de points au total est de

48 pour la partie portant principalement sur les travaux pratiques

180 dont 60 de QCMs pour la partie portant principalement sur le cours enseigné

Durée totale de l'examen: 3 heures (15h15 à 18h15).

Hormis les QCMs qui comptent pour 3 points pour une réponse correcte ou -1 point pour une réponse incorrecte, le nombre de points alloués à chaque question est indiqué en fin de son énoncé.

Note importante : une réponse donnant seulement un résultat numérique ou un « oui » ou « non » sans explication constitue une réponse incomplète qui ne recevra pas tous les points alloués (et en outre ne permettra pas de donner des points partiels).
Donnez donc explicitement à chacune de vos réponses votre raisonnement.

Votre Nom de famille puis votre Prénom :

Votre Numéro identifiant Sciper (= numéro sur carte Camipro):

PARTIE PORTANT SUR LES TRAVAUX PRATIQUES - 48 crédits au total

Certaines de ces questions (mais pas toutes) sont des questions à choix multiples (QCM, marquées comme telles) donnant 4 options. Pour chacune de ces questions vous aurez +3 points pour une réponse correcte, -1 point pour une réponse incorrecte. Pour répondre aux QCMs marquez d'une croix ou d'une coche le petit cercle correspondant à votre réponse. Dans chacune des questions une seule option est correcte. Si vous faites des ratures ou marquez plus d'un cercle il faudra indiquer avec des mots laquelle des options constitue votre réponse finale.

TP TRACTION

TP 1 (QCM)

Les différentes éprouvettes plates métalliques (notamment en cuivre, laiton, Al6082, S235) testées pendant le TP de traction à l'aide de la machine Zwick 100kN se sont rompues avec un faciès de rupture faisant un angle relativement constant par rapport à l'axe de traction, indépendamment de leur microstructure ou composition. Indiquez laquelle des affirmations suivantes explique ce phénomène.

- Sous traction uniaxiale, les éprouvettes plates de métaux ductiles se rompent principalement par cisaillement, et le font donc à un angle proche de 45 degrés par rapport à l'axe de traction car les contraintes de cisaillement sont maximales à cet angle selon le cercle de Mohr.
- La striction est le phénomène qui amorce la rupture des métaux, et celle-ci a lieu à un angle de 45° par rapport à l'axe de traction
- Les échantillons contenaient tous une fissure originellement orientée à 45° par rapport à l'axe de traction (ils provenaient du même lot de matériau et avaient été tous usinés de la même façon)
- Sous traction uniaxiale, les éprouvettes plates de métaux ductiles se rompent principalement par déchirement et le font donc à un angle proche de 90 degrés par rapport à l'axe de traction car les contraintes de traction sont maximales à cet angle selon le cercle de Mohr.

TP 2 (QCM)

Au cours du TP Traction, on a testé deux échantillons d'Al6082, de composition identique mais ayant des histoires thermomécaniques et donc des microstructures différentes.

Avant le test, un des échantillons a été chauffé à 180°C pendant 1h30min suivi d'un refroidissement lent, conduisant à l'état Al6082-O.

L'autre échantillon a été chauffé à 540°C pendant 2h, puis trempé dans l'eau, et enfin chauffé à 180°C pendant 1h30min puis trempé à nouveau à l'eau, conduisant à l'état Al6082-T6.

Choisissez parmi les options ci-dessous celle qui décrit les propriétés mécaniques obtenues.

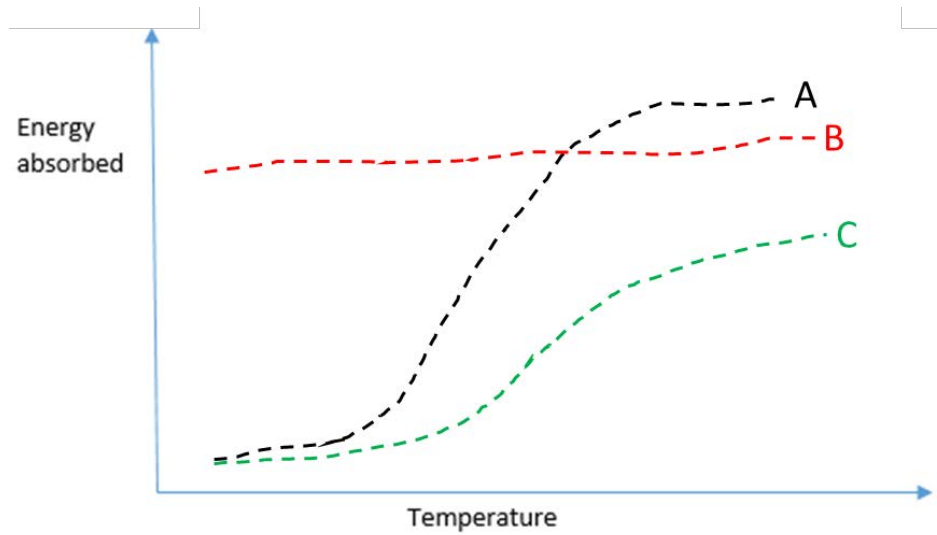
- Par rapport à l'Al6082-O, l'Al6082-T6 présente une résistance à la traction et une limite d'élasticité environ trois fois plus élevées en raison de la germination et de la maturation de précipités de Mg₂Si au cours de la dernière étape (1h30min à 180°C) du traitement thermique T6.
- Par rapport à l'Al6082-T6, l'Al6082-O présente une résistance à la traction environ trois fois supérieure, une limite d'élasticité plus élevée et une ductilité équivalente, en raison d'une durée globale de traitement thermique plus courte et d'une température plus basse du traitement thermique, ce qui a limité la mobilité atomique ainsi que ses conséquences.
- L'Al6082-O et l'Al6082-T6 présentent tous deux un module d'Young similaire, menant par conséquent à une limite d'élasticité similaire, tous deux étant directement liés à la force de liaison atomique, tandis que la formation de précipités de Mg₂Si dans l'Al6082-T6 au cours de la trempe augmente sensiblement la résistance à la traction.
- L'Al6082-T6 présente une résistance à la traction, une limite d'élasticité et un allongement à la rupture supérieurs à ceux de l'Al6082-O, en raison de la contribution du mécanisme de renforcement par précipitation au cours de la dernière étape de chauffage (1h30min à 180°C) du traitement thermique T6.

TP RESILIENCE

TP 3

(6 points au total, sous forme de 2 points par association courbe-matériau correcte, -1 point par association incorrecte)

A partir des points de données collectés dans le TP Charpy pour les trois compositions d'acier différentes, vous avez obtenu un graphe avec trois courbes similaires à celui ci-dessous. Pouvez-vous assigner chacune de ces courbes à chacun des trois matériaux ci-dessous ?



- Acier contenant 18 pds% de Cr et 10 pds% de Ni
- Acier au carbone contenant 0.15 pds% de C
- Acier au carbone contenant 0.15 pds% de C et 3.5 pds% de Ni.

TP ECROUISSAGE

TP 4

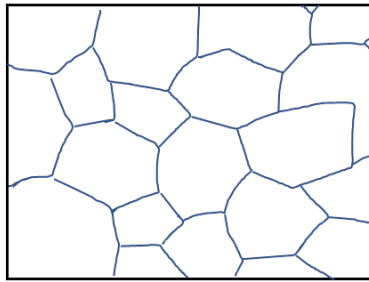
(9 points au total, sous forme de 3 points pour réponse correcte, 0 point pour réponse incorrecte):

Le schéma (a) ci-dessous représente les joints de grains tels qu'on les voit au microscope optique après polissage et attaque chimique similaires à ce que vous avez fait durant le TP Ecrouissage, vus à un grossissement de 100x sur un échantillon poli d'aluminium pur (point de fusion = 660°C) d'une épaisseur initiale de 10 mm après réduction de son épaisseur de 10 à 5 mm suivie d'un recuit à 600°C pendant 6h. Représentez schématiquement, à la même échelle, dans les rectangles ci-dessous les microstructures que vous vous attendez à trouver dans le même échantillon après que ce métal ait été soumis à différentes conditions de laminage et traitements thermiques (a, b, c) :

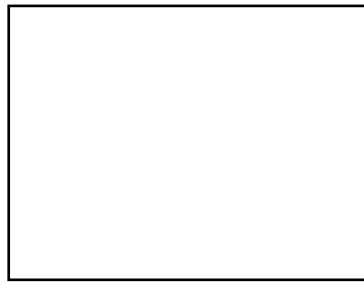
- Laminé dans le même sens jusqu'à une épaisseur finale de 1 mm
- Laminé dans le même sens jusqu'à une épaisseur finale de 1 mm, puis soumis à un recuit à 600°C pendant 20 minutes ayant mené à la recristallisation de 50% de la microstructure puis trempé dans l'eau
- Laminé dans le même sens jusqu'à une épaisseur finale de 1 mm, puis soumis à un recuit à 600°C pendant 6h et trempé dans l'eau

Indiquez la direction de laminage dans vos croquis.

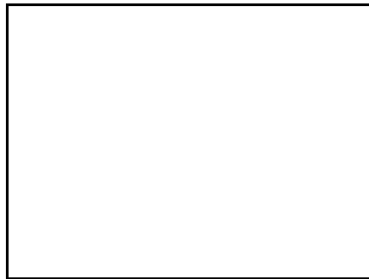
Après recuit à 600°C pendant 6h



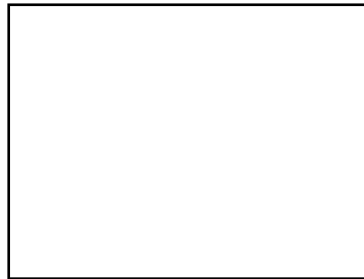
a)



b)



c)



TP WEIBULL

TP 5 (QCM)

Le module de Weibull (m) est un paramètre matériau caractéristique de la dispersion des défauts au sein du matériau, lié à la largeur de la fonction de distribution de la probabilité de rupture, de telle sorte que:

- Lorsque m est faible, la répartition des défauts est très hétérogène, et on observera donc une grande dispersion des contraintes à rupture dans un volume V de matière
- Lorsque m est élevé, la répartition des défauts est très hétérogène, et on observera donc une grande dispersion des contraintes à rupture dans un volume V de matière
- Lorsque m est faible, la répartition des défauts est relativement homogène, et on observera donc une faible dispersion des contraintes à rupture dans un volume V de matière
- Lorsque m est élevé, la répartition des défauts est relativement homogène, et on observera donc une grande dispersion des contraintes à rupture dans un volume V de matière

TP 6 (QCM)

En pratique on déduit m de la pente de la droite passant par les points d'un graphe de

- $\ln[-(1-P_F)]$ en fonction de $\ln(\sigma_F)$
- $\ln[-\ln(1-P_F)]$ en fonction de $\ln(\sigma_F)$
- $\ln[-\ln(P_F)]$ en fonction de $\ln(\sigma_F)$
- $-\ln(1-P_F)$ en fonction de $\ln[-\ln(1-\sigma_F)]$

où P_F est la probabilité de rupture si $\sigma \geq \sigma_F$, avec σ et σ_F la valeur maximale de la contrainte au sein de l'échantillon.

TP TRAITEMENT THERMIQUE

TP 7

Répondez de manière concise dans l'espace prévu à cet effet aux questions suivantes à partir des connaissances que vous avez acquises lors du TP Traitements thermiques :

a - Pourquoi la martensite n'apparaît-elle pas sur les diagrammes de phase Fe-Fe₃C ou Fe-C ?

2 points

Réponse :

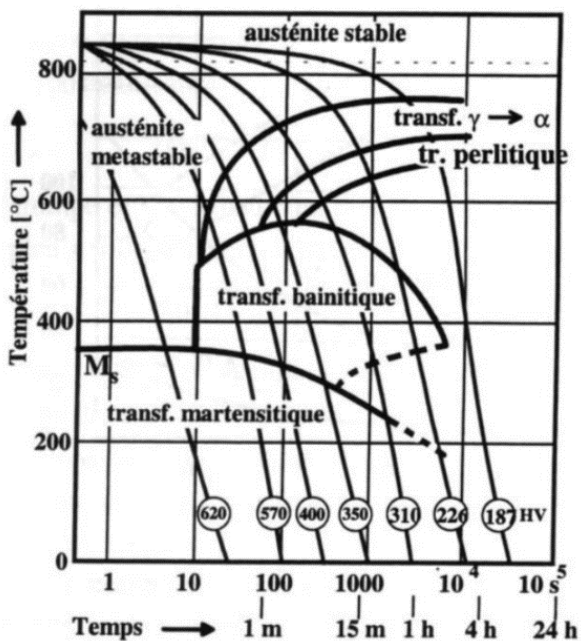
b - Pourquoi la martensite est-elle plus dure que la ferrite (α)?

3 points

Réponse :

c – Jacques Grobétaz suit le TP de l'essai Jominy avec un acier dont le diagramme TRC est ci-dessous. Il fait tout comme il faut mais oublie d'ouvrir la vanne d'eau après avoir sorti le barreau du four. Il ne se rend pas compte de l'oubli et continue le TP comme si de rien n'était. Pouvez-vous dessiner à droite du diagramme ce à quoi ressemblera la courbe Jominy qui résultera de son expérience ?

4 points



TP MICROSTRUCTURES

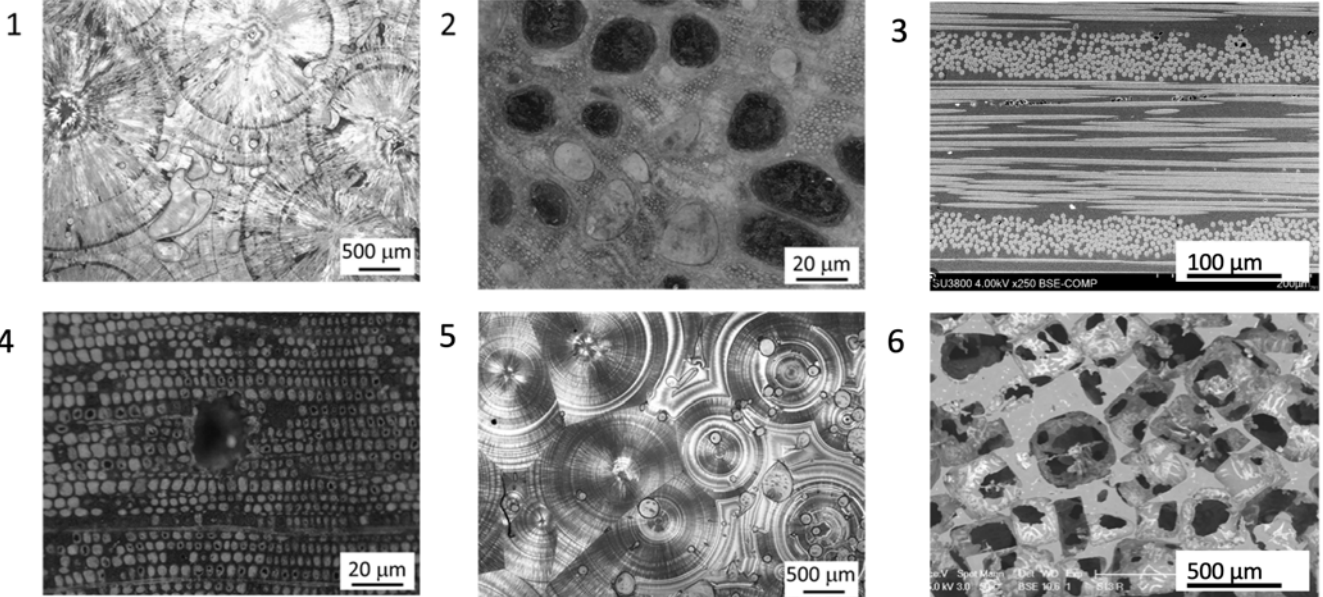
TP 8

(6 points au total, sous forme de 1 point par numérotation correcte)

Sélectionnez le numéro de l'image correspondant à chaque microstructure ci-dessous :

- Sphérulites de PEG* refroidi de 60°C à -20°C en 1 minute
- Mousse d'aluminium
- Sphérulites de PEG* refroidi de 60°C à 25°C en 5 minutes
- Bois résineux (softwood)
- Bois feuillu (hardwood)
- Composite fibres de verre matrice époxy

*PEG : polyéthylène glycol



TP SELECTION DE MATERIAUX

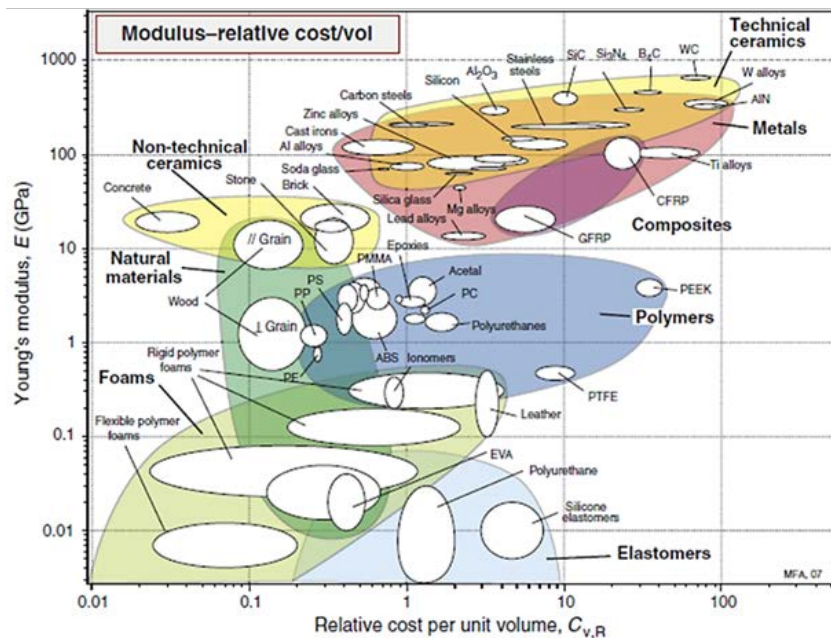
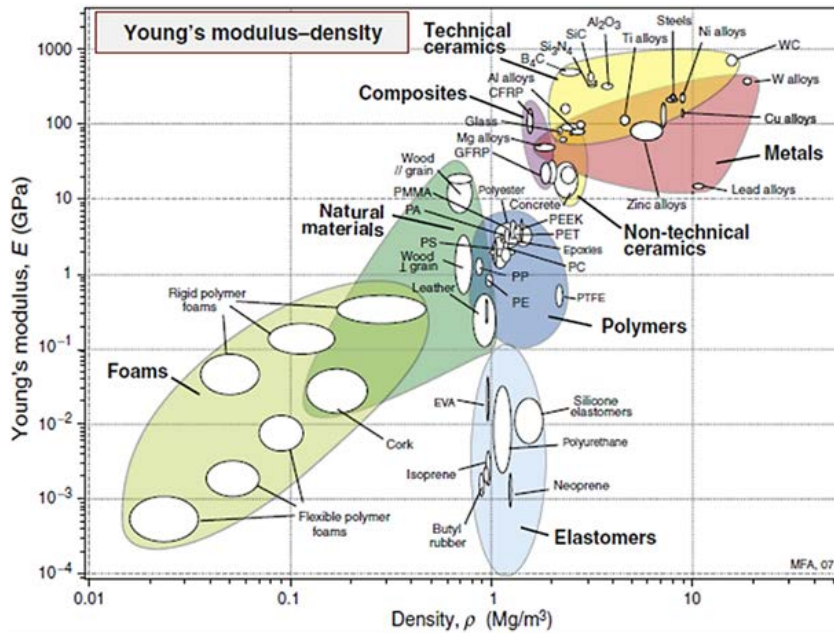
TP 9

(6 points au total)

Les critères de sélection des matériaux pour un certain produit comprennent des besoins tels que : minimiser la masse, minimiser le coût, maximiser un des rapports E/ρ , σ_Y/ρ , E/ρ^2 , etc. D'après les diagrammes d'Ashby en page suivante, classez les matériaux candidats suivants du plus (1) au moins (4) approprié pour la conception d'un composant structural à haute rigidité destiné à la construction des sièges d'un train de passagers et sollicité en contrainte uniaxiale (où on cherche à maximiser E/ρ): CFRP (plastique renforcé de fibres de carbone), alliages de zinc (Zinc alloys), alliages de magnésium (Mg alloys) et alliages de tungstène (W alloys) ?

- CFRP
- Alliages de zinc
- Alliages de magnésium
- Alliages de tungstène

Justifiez en quelques mots votre premier choix pour cette application:



Vous pouvez remplir le tableau suivant pour vous aider (mais ce n'est pas obligatoire)

Materiau	Densité [Mg/m ³]	Coût relatif [C _{v,R}]	E/ρ [GPa · m ³ /Mg]	Classement
CFRP				
Alliages de Zn				
Alliages de Mg				
Alliages de W				

PARTIE PORTANT SUR LE COURS ENSEIGNÉ

QUESTIONS A CHOIX MULTIPLES (20 QCMs ; 60 POINTS AU TOTAL):

Pour chacune de ces questions vous aurez +3 points pour une réponse correcte, -1 point pour une réponse incorrecte. Pour répondre aux QCMs marquez d'une croix ou d'une coche le petit cercle correspondant à votre réponse. Dans chacune des questions une seule option est correcte. Si vous faites des ratures ou marquez plus d'un cercle il faudra indiquer avec des mots laquelle des options constitue votre réponse finale.

1 – Lors d'un essai de traction, dans la section réduite du barreau de traction et avant l'amorçage de la striction :

- La déformation est uniforme et se réduit à une seule composante, orientée selon l'axe de traction
- La contrainte est uniforme et se réduit à une seule composante, orientée selon l'axe de traction
- La contrainte et la déformation sont toutes deux uniformes et se réduisent à une seule composante, orientée selon l'axe de traction
- La contrainte et la déformation sont toutes deux uniformes et se réduisent à une seule composante, orientée selon l'axe de traction pour la contrainte, perpendiculairement à celui-ci pour la déformation

2 – La striction est :

- Une instabilité mécanique causée dans les polymères par un alignement des chaînes moléculaires
- Une instabilité mécanique qui fait que la déformation se concentre en une zone restreinte du barreau de traction d'un matériau élastoplastique
- Une instabilité mécanique qui se manifeste lorsque la déformation plastique vient, comme dans les aciers au carbone ou des polymères, avec une chute de la contrainte d'écoulement
- Une instabilité mécanique qui mène à la rupture par fissuration brutale d'un barreau de traction

3 – Un essai de relaxation uniaxial est utilisé pour mesurer :

- L'évolution dans le temps de la contrainte appliquée à un matériau pour le déformer jusqu'à une certaine déformation laquelle est ensuite maintenue constante
- L'évolution dans le temps de la déformation d'un matériau sous charge ou contrainte appliquée constante
- L'évolution de la contrainte requise pour déformer un matériau, mesurée en fonction de son allongement relatif à vitesse de déformation décroissante
- La ténacité des matériaux ductiles sujets au fluage

4 - La relation dans un essai de traction entre l'allongement relatif (engineering strain) e et la déformation vraie (true strain) ϵ est :

- $\epsilon = (1+e)$
- $e = (1+\epsilon)$
- $e = \ln(1+\epsilon)$
- $\epsilon = \ln(1+e)$

5 - La relation dans un essai de traction entre la charge unitaire (engineering stress) R et la contrainte vraie (true stress) σ est

- $\sigma = R(1+e)$
- $R = \sigma(1+e)$
- $\sigma = \ln(1+R)$
- $R = \ln(1+\sigma)$

6 - La loi de fluage caractéristique des métaux et alliages donnant la vitesse de déformation en régime permanent $\dot{\varepsilon}$ exprimée en termes de la contrainte vraie (true stress) σ et de la déformation vraie (true strain) ε , est:

- $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = A \sigma^N e^{\frac{Q}{RT}}$
- $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = A e^{\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m} e^{\frac{Q}{RT}}$
- $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = A e^{\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m} e^{\frac{-Q}{RT}}$
- $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = A \sigma^N e^{\frac{-Q}{RT}}$

où Q est une énergie d'activation, R la constante des gaz parfaits, T la température (en K), V le volume de l'échantillon de traction, V_0 et σ_0 un volume et une contrainte de référence, respectivement, m , N et A des constantes.

7 – Le verre peut se rompre spontanément pendant une trempe à partir d'une température (élevée) à laquelle il est solide car :

- Lors de la trempe la surface externe du verre se contracte avant le cœur du verre
- Lors de la trempe le cœur du verre se contracte avant la surface externe du verre
- Après la trempe les contraintes résiduelles au sein du verre engendrent la croissance de fissures du cœur vers la surface
- Lors de la trempe la surface externe du verre peut se déformer librement puis contraint le cœur du verre, qui se fissure à partir des défauts qu'il contient.

8 – Le verre est durci par une trempe depuis une température à laquelle le verre est fluide car :

- Lors de la trempe le cœur du verre se contracte avant la surface externe du verre,
- Lors de la trempe la surface du verre peut se contracter librement, sans accumuler de contrainte,
- Lors de la trempe la contraction thermique peut se faire entièrement sans formation de contraintes internes au sein du verre.
- Lors de la trempe la surface externe du verre peut se contracter alors que le cœur du verre est encore chaud et fluide.

9 – Dans une pièce faite d'une céramique fragile contenant une fissure orientée perpendiculairement à une contrainte externe de traction uniaxiale et nettement plus petite que la largeur de la pièce, si la longueur de la fissure est doublée, alors la contrainte à rupture de la pièce :

- Diminue par un facteur environ de 2
- Diminue par un facteur environ de $\sqrt{2}$
- Ne change pas
- Augmente par un facteur environ de $\sqrt{2}$

10 – La ségrégation mineure, ou microségrégation, est:

- Une inhomogénéité de la taille des grains d'un alliage solidifié
- Une distribution inhomogène et non prévue par le diagramme de phase d'éléments d'alliage au sein de la microstructure d'un alliage solidifié
- Une ségrégation résultant de la migration, vers la surface d'un alliage solidifié, d'impuretés ayant une densité plus faible que l'alliage à l'état fondu
- Une ségrégation au sein d'un alliage solidifié et à échelle microscopique d'éléments d'alliage dont l'importance est mineure

11 – Pour diminuer la taille du grain (= taille moyenne des cristaux) d'un alliage recristallisé on peut :

- Diminuer l'écroutissage qu'il a subi avant recuit
- Augmenter l'écroutissage qu'il a subi avant recuit
- Augmenter le temps du recuit
- Diminuer le nombre de précipités qu'il contient

12 – Les alliages de corroyage d'aluminium que l'on peut durcir par durcissement structural sont :

- Les alliages des séries 1xxx, 2xxx et 6xxx
- Les alliages des séries 2xxx, 3xxx et 5xxx
- Les alliages des séries 2xxx, 6xxx et 7xxx
- Les alliages des séries 2xxx, 5xxx et 6xxx

13 – La crique ou corrosion saisonnière (season cracking) est:

- Une fissuration de tous les alliages du cuivre causée par l'absorption d'hydrogène pendant la coulée
- Une attaque préférentielle des éléments d'alliage des alliages du cuivre laissant un réseau de cuivre poreux là où a eu lieu l'attaque
- Une fissuration d'alliages du cuivre causée par la conjonction d'une espèce chimique comme l'ammoniaque et d'une contrainte appliquée ou interne
- La formation de bulles d'eau au sein d'alliages de cuivre exposés à des milieux gazeux contenant de l'hydrogène.

14 – La microstructure d'un acier au carbone contenant 0.77% de carbone refroidi lentement comprendra :

- Environ 15% de ferrite et 85% de perlite
- Environ 25% de ferrite et 75% de perlite
- Environ 50% de ferrite et 50% de perlite
- Environ 100% de perlite

15 – La trempabilité des aciers :

- Augmente avec la teneur en carbone
- Augmente avec une diminution de la taille de grains de l'austénite
- Diminue avec la teneur en chrome
- Augmente avec la ductilité de l'acier

16 – Un acier inoxydable contient :

- Au moins 18%massique de chrome et 8%massique de nickel
- Au moins 18%massique de nickel et 8%massique de chrome
- Au moins 12%massique de chrome
- Au moins 12%massique de cuivre.

17 – La température de transition vitreuse, T_g , d'un polymère est la température

- Au-dessus de laquelle les liaisons secondaires perdent leur rigidité
- Au-dessous de laquelle le liquide refroidi devient un solide amorphe
- Au-dessus de laquelle le polymère devient transparent
- Au-dessous de laquelle le polymère devient transparent

18 – La contrainte requise pour déformer un polymère thermoplastique à une déformation fixe donnée :

- Est au moins égale à 1 GPa
- Est indépendante de la température
- Augmente si la température augmente
- Diminue si la température augmente

19 – En viscoélasticité linéaire

- La complaisance à temps fixe est une fonction linéaire de la contrainte
- La complaisance à temps fixe ne dépend pas de la contrainte
- La rigidité à temps fixe est une fonction linéaire de la contrainte
- La déformation à contrainte fixe est une fonction linéaire de la température

20 - Les fibres de carbone utilisées pour produire des composites ont :

- Une résistance mécanique et une rigidité élevées parallèlement aux fibres et faibles perpendiculairement à celles-ci
- Une résistance mécanique et une rigidité élevées parallèlement aux fibres et perpendiculairement à celles-ci
- Une résistance mécanique élevée et un module d'Young faible parallèlement aux fibres
- Une résistance mécanique faible et un module d'Young élevé parallèlement aux fibres

QUESTIONS COMPTANT POUR 120 POINTS AU TOTAL :

21 – a - Quelle est la définition de la viscosité η d'un fluide Newtonien ?

(3 points ; définissez tous les termes pour avoir tous les points)

Réponse :

b – Si le mécanisme de déformation du fluide est régi par l'activation thermique, montrez que $\eta = \eta_0 \exp(+Q/RT)$

où Q est une énergie d'activation exprimée en kJ/mol, $R = 8.32 \text{ J} \cdot (\text{K mol})^{-1}$ est la constante des gaz parfaits, et η_0 est une constante. Quelles sont les unités de η_0 ?

(4 points ; explicitez votre raisonnement pour avoir tous les points)

Réponse :

c – L'énergie d'activation Q qui gouverne la déformation d'un verre sodocalcique est $Q = 362$ KJ/mol. Si la viscosité de ce verre est $\eta = 10^{11}$ Pa·s à 600°C , quelle sera sa viscosité à $1'100^\circ\text{C}$? (3 points)

Réponse :

d – Calculez l'ordre de grandeur (rien de plus) de la force requise pour étirer à un taux de déformation de 0.1 s^{-1} une feuille du même verre sodocalcique que celui de la dernière question mesurant 1 m de longueur et de largeur et 10 mm d'épaisseur à $1'100^\circ\text{C}$: est-ce faisable par un ouvrier manuel ? (4 points)

Réponse :

23 – Vous travaillez dans une entreprise qui fabrique des pièces en alumine Al_2O_3 polycristalline, laquelle a les propriétés suivantes, que nous supposons être indépendantes de la température :

- Module d'Young $E = 390 \text{ GPa}$;
- Coefficient de Poisson $\nu = 0.23$;
- Coefficient de dilatation thermique moyen du matériau polycristallin : $\alpha = 8.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- Densité $\rho = 3900 \text{ kg/m}^3$
- Valeur critique du facteur d'intensité des contraintes (ténacité) $K_c = 4 \text{ MPa m}^{1/2}$
- Exposant de la distribution de Weibull $m = 24$
- Contrainte de référence σ_0 pour un volume de référence $V_0 = 10^{-6} \text{ m}^3$ mesurée par des essais de traction uniaxiale: $\sigma_0 = 380 \text{ MPa}$.

La statistique de rupture de cette céramique est dictée par des défauts en volume, qui dans ce matériau fritté sans pores sont des microfissures orientées aléatoirement qui se forment aux joints de grain.

a – Quelle est la probabilité de rupture d'un échantillon de l'alumine en question sous une contrainte uniaxiale de 300 MPa si le volume de l'échantillon est de 1 cm^3 ?

(4 points)

Réponse :

b – Quelle est la probabilité de rupture d'un échantillon de l'alumine en question sous une contrainte uniaxiale de 300 MPa si le volume de l'échantillon est de 10 cm^3 ?

(2 points)

Réponse :

c – Quelle est la probabilité de rupture d’un barreau à section carrée de 10 cm^3 du même matériau sollicité en flexion trois points sous une contrainte maximale $\sigma_{\max} = 300 \text{ MPa}$ sachant que pour la flexion trois points $k_m = \frac{1}{2(m+1)^2}$.

(2 points)

Réponse :

d – Pourquoi la probabilité de rupture à contrainte maximale donnée est-elle bien plus faible pour l’essai de flexion trois points que pour l’essai de traction ?

(2 points)

Réponse :

e – Pour une céramique, ce matériau est-il à haute ou faible performance du point de vue de ses propriétés mécaniques ?

(3 points ; justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

Réponse :

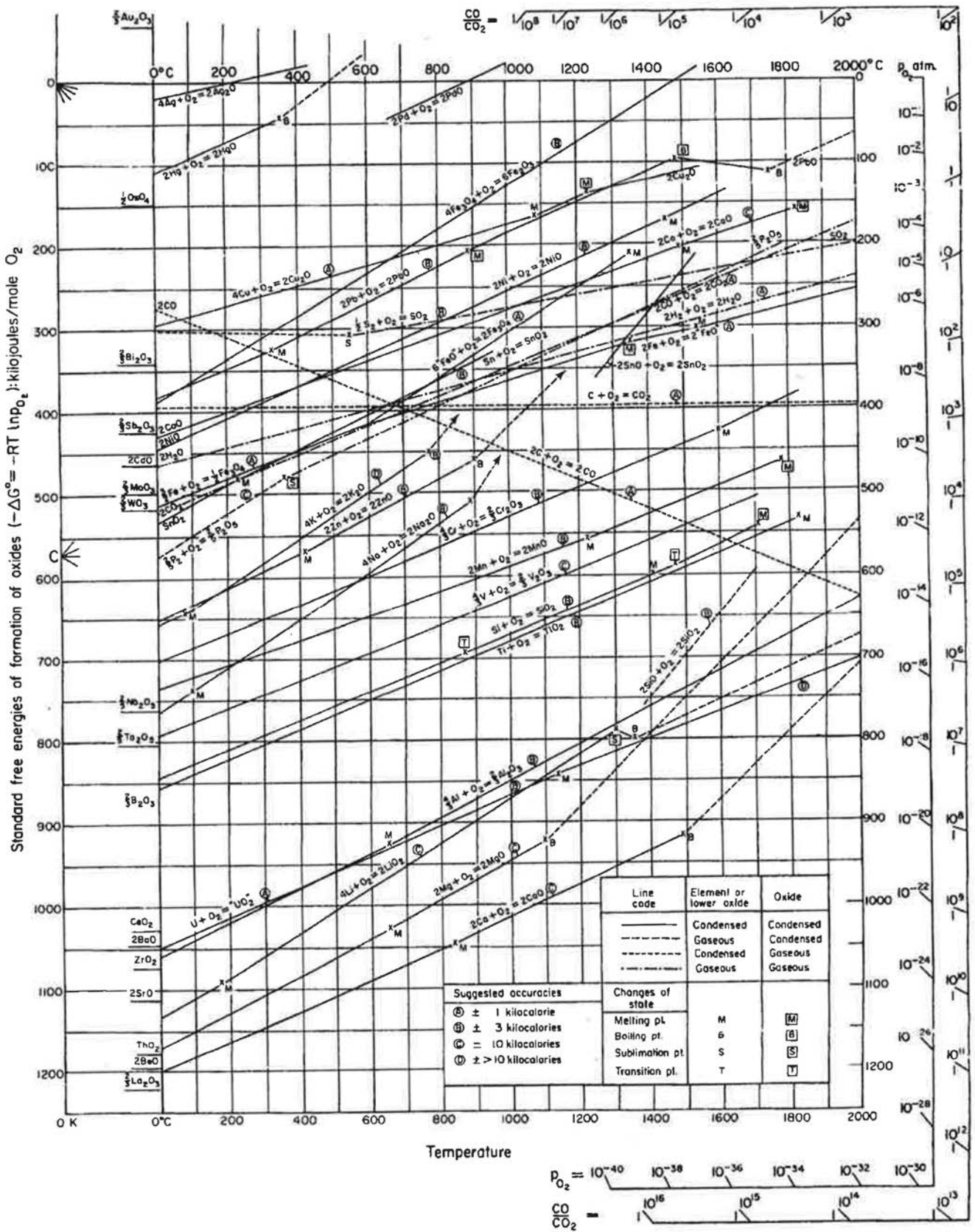
f - Les défauts internes qui dictent la résistance mécanique de ce matériau sont des fissures formées le long des joints entre les grains par des contraintes internes dues à la contraction thermique anisotrope des cristaux d'alumine. Ces fissures internes ont donc une longueur de l'ordre de grandeur du diamètre, d , des grains au sein l'alumine polycristalline, et leur distribution en taille dépend de celle des tailles de grains au sein du matériau.

Pouvez-vous estimer la taille d des grains au sein de cette alumine polycristalline ?

(4 points)

Réponse :

24 – Vous trouverez ci-dessous le diagramme d'Ellingham.



a – Quel est le changement d'énergie libre $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à la réduction (inverse de l'oxydation) de l'oxyde FeO (= la wüstite) pour produire de l'oxygène et du fer à 1'000°C, en kJ/mole **Fe** ?

(2 points ; indiquez le signe)

Réponse :

b – Quel est le changement d'énergie libre $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à la réduction (inverse de l'oxydation) de l'oxyde Fe₃O₄ (= la magnétite) pour produire de l'oxygène et du fer à 1'000°C, en kJ/mole **Fe** ?

(7 points ; n'oubliez pas d'indiquer le signe)

Réponse :

c – La magnétite Fe₃O₄ peut-elle être réduite par l'aluminium ?

(3 points)

Réponse :

25 – Ci-dessous vous trouverez un graphe extrait du livre de J. Barralis et G.Maeder intitulé « Précis de Métallurgie » donnant la résistance mécanique à température ambiante d’alliages préalablement exposés pendant 10'000 heures à température élevée.

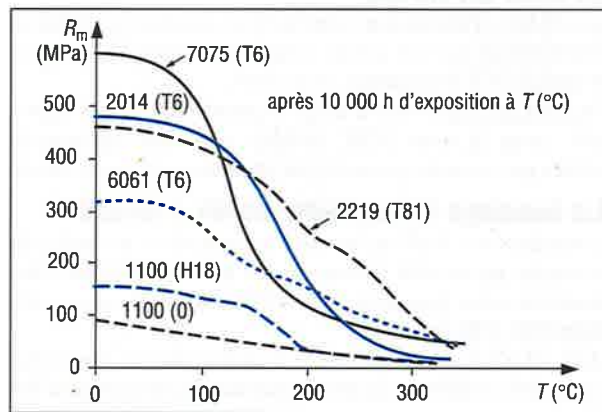


Fig. 13. Résistance à chaud de différentes familles d’alliages d’aluminium (d’après Aluminium Pechiney)

a – Quels sont les mécanismes par lesquels la résistance mécanique de l’alliage 1100 est augmentée entre l’état (O) et (H18) ?

(2 points; une réponse correcte reçoit 2 points, une réponse incorrecte -1 point)

- l'écroutissage
- le durcissement par formation de précipités
- durcissement par écroutissage et formation de précipités

b – Quels sont les mécanismes par lesquels l’alliage 2014T6 est principalement durci ?

(2 points; une réponse correcte reçoit 2 points, une réponse incorrecte -1 point)

- l'écroutissage
- le durcissement par formation de précipités
- durcissement par écroutissage et par formation de précipités

c – Quels sont les mécanismes par lesquels la résistance mécanique de l’alliage 1100H18 est diminuée entre 150 et 200°C ?

(2 points; une réponse correcte reçoit 2 points, une réponse incorrecte -1 point)

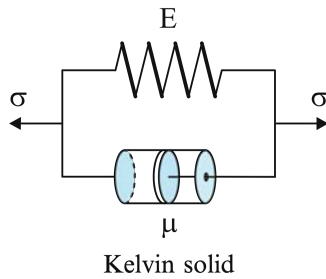
- La restauration et la recristallisation
- La maturation de précipités
- La restauration, la recristallisation et la maturation de précipités

d – Quels sont les mécanismes par lesquels la résistance mécanique de l’alliage 2014T6 est diminuée entre 150 et 200°C ?

(2 points; une réponse correcte reçoit 2 points, une réponse incorrecte -1 point)

- La restauration et la recristallisation
- La maturation de précipités
- La restauration, la recristallisation et la maturation de précipités

26 – Considérez le modèle simple de Kelvin, utilisé pour simuler la loi de déformation uniaxiale des polymères



a - Comme vous le voyez, il s'agit d'un piston et d'un ressort, tous deux linéaires, assemblés en parallèle. Montrez que lors d'un essai de fluage la réponse du solide viscoélastique simulée par cet élément est donnée par :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-t/\tau})$$

où $\tau = \mu/E$ et σ_0 est la contrainte appliquée.

(5 points)

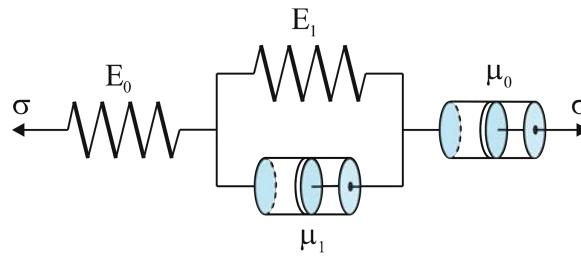
Réponse :

b – Ce modèle est trop simple pour simuler le comportement des polymères thermoplastiques : pourquoi ?

(2 points)

Réponse :

c – Pour remédier à ce défaut, corriger le fait que le modèle de Kelvin a une rigidité infinie à $t = 0$ et simuler le comportement des polymères thermoplastiques, on utilise plus souvent le modèle dit à quatre paramètres, où un ressort et un piston linéaires sont ajoutés en série au modèle de Kelvin :



Four parameter fluid

Montrez que sa loi de déformation lors d'un essai de fluage est :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-t/\tau}) + \frac{t}{\mu_0} \right]$$

où $\tau = \mu_1/E_1$ et σ_0 est la contrainte appliquée.

(2 points)

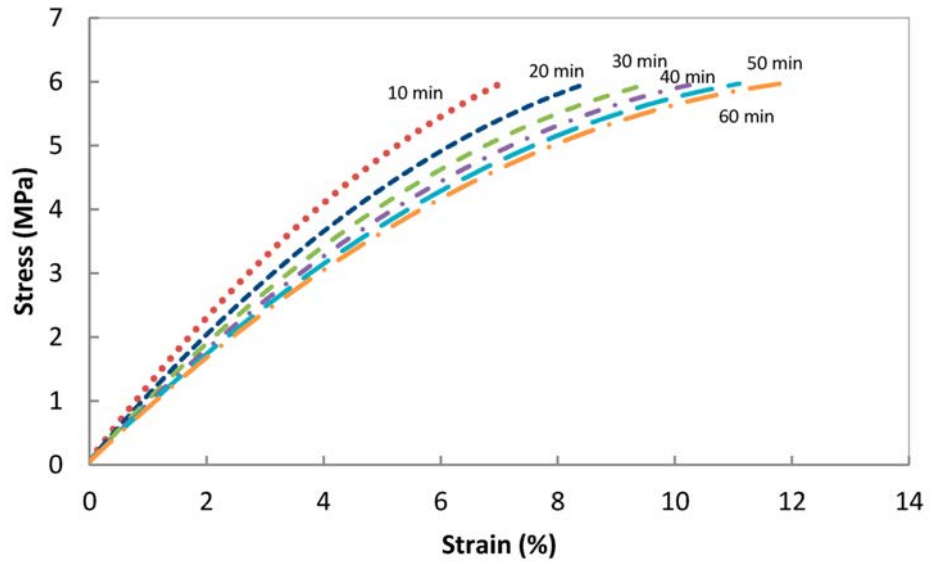
Réponse :

d - Un matériau composé d'une matrice de polyéthylène de faible densité contenant des particules d'élastomère est soumis à une série d'essais de fluage, conduits pour une série de contraintes appliquées allant de 1 à 6 MPa, le tout à température ambiante par les auteurs de la publication scientifique suivante :

F. Daver, M. Kajtaz, M. Brandt, R.A. Shanks, Creep and Recovery Behaviour of Polyolefin-Rubber Nanocomposites Developed for Additive Manufacturing, *Polymers* 8 (2016) 437. <https://doi.org/10.3390/polym8120437>.

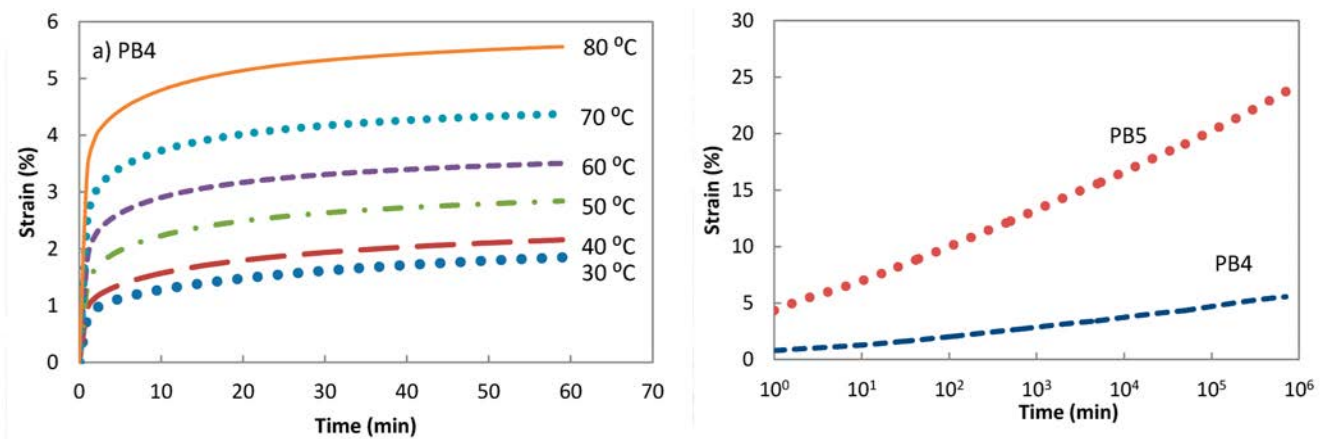
De ces essais de fluage les auteurs ont tracé un graphe où, pour chacune des contraintes appliquées lors de la série d'essais de fluage, les auteurs ont rapporté les déformations mesurées pour un temps d'essai donné, chaque temps donnant ainsi une courbe déformation-contrainte (dite isochrone).

Pourquoi le modèle à quatre paramètres ci-dessus ne peut-il pas être utilisé pour des contraintes appliquées supérieures à 3 MPa environ avec ce matériau ?



(2 points)
Réponse :

e – Les auteurs ont ensuite conduit une série d’essais de fluage en utilisant une charge appliquée de 1.2 MPa, inférieure à 3 MPa. En faisant varier la température pour un de ces matériaux polymériques (PB4) les courbes de fluage mesurées sont tracées dans le graphe de gauche donné ci-dessous :



Gauche : courbes de fluage, toutes pour une contrainte appliquée de 1.2 MPa, du composite LDPE/élastomère PB4. Droite : « master curve » pour la déformation à cette contrainte de 1.2 MPa et à une température de référence égale à 30°C pour ce matériau (ainsi qu’un autre, PB5), déduite des données de fluage dans le graphe de gauche en utilisant l’hypothèse du « Time Temperature Superposition Principle ».

g – Quelle sera la déformation estimée, selon cette approche, que montrera ce matériau PB4 après avoir été soumis pendant un an à une contrainte de traction fixe de 3 MPa à 30°C.

(2 points)

Réponse :

h – Pouvez-vous tracer sur le graphe ci-dessus la Master curve valable à 50°C au lieu de 30°C ? (3 points ; expliquez votre réponse et donnez vos calculs ci-dessous)

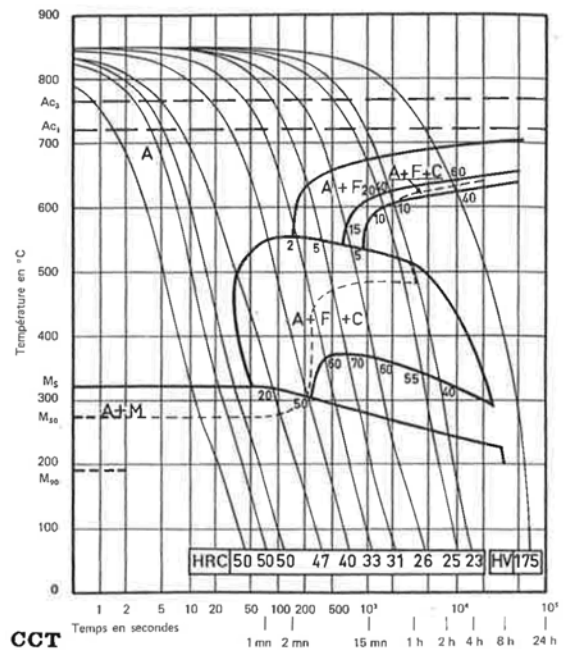
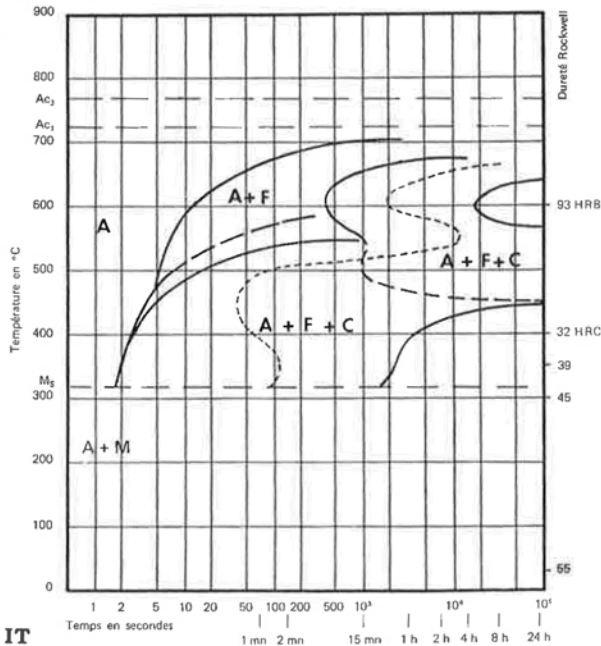
Réponse :

27 – Ci-dessous vous trouverez les diagrammes TTT et TRC d'un acier faiblement allié.

30 NC 11 Steel

Composition: 0.32% C - 0.30% Mn - 0.20% Si - 0.008% S - 0.017% P - 2.95% Ni - 0.69% Cr - <0.10% Mo - 0.31% Cu - <0.030% V - 0.06% W Grain size: 12 Austenitized at 850°C (1562°F) for 30 min

Composition: 0.32% C - 0.30% Mn - 0.20% Si - 0.008% S - 0.017% P - 2.95% Ni - 0.69% Cr - <0.10% Mo - 0.31% Cu - <0.030% V - 0.06% W Grain size: 12 Austenitized at 850°C (1562°F) for 30 min



$Ac_1 = 720^{\circ}C$ $Ac_3 = 765^{\circ}C$ $M_s = 320^{\circ}C$

a – Que veulent dire les lettres A, C, F, M dans ce graphe ?
(2 points au total).

Réponse:

A = _____

C = _____

F = _____

M = _____

b – Cochez la réponse correcte dans les options ci-dessous

(10 points au total; une réponse correcte à chacune de ces questions reçoit 2 points, une réponse incorrecte -1 point).

Pour produire une structure presque entièrement martensitique on peut

- tremper l'alliage jusqu'à la température ambiante de façon telle que 400°C soit traversé en moins de 20 secondes
- tremper l'alliage jusqu'à la température ambiante de façon à atteindre 200°C en plus de 8 heures
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure 100% perlitique on peut

- tremper l'alliage de façon à atteindre 200°C en plus de 8 heures
- tremper l'alliage de façon à atteindre 500°C en moins de 10 secondes et le maintenir pendant plus de 8 heures à cette température
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure composée à 50% de bainite et 50% de martensite on peut

- tremper l'alliage de façon à atteindre 200°C en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre 300°C en 200 secondes puis continuer à le refroidir jusqu'à l'ambiante
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure contenant à 60% de ferrite et 40% de perlite on peut

- tremper l'alliage de façon à atteindre 200°C en une heure
- tremper l'alliage de façon à atteindre 200°C en plus de 10 heures
- Ce n'est pas possible.

Pour produire une structure 100% bainitique on peut

- tremper l'alliage jusqu'à la température ambiante de façon telle que 400°C soit traversé en 300 secondes exactement
- tremper l'alliage de façon à atteindre 350°C en moins de 2 secondes puis le maintenir pendant plus de 2 heures à cette température puis refroidir l'alliage jusqu'à la température ambiante
- Ce n'est pas possible.

c - Dans le diagramme ci-dessous, vous trouverez les courbes de refroidissement température/temps, en fonction du diamètre d'un long barreau cylindrique de l'acier des diagrammes TTT et TRC ci-dessus, lors d'une trempe depuis la température d'austénitisation de 850°C dans une bain d'huile à température ambiante :

- en traits continus au cœur (= le long de l'axe central) du barreau
- en traits pointillés à la surface du barreau. Notez que pour les trois diamètres les plus petits, de 10, 20 et 40 mm, les traits continus et pointillés sont superposés faisant qu'on ne distingue plus ces derniers.

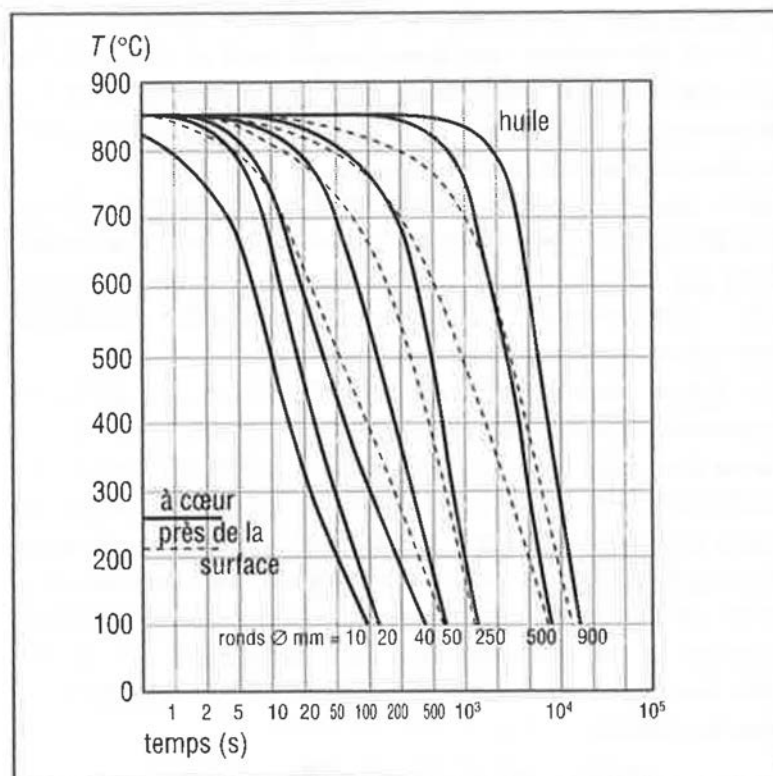
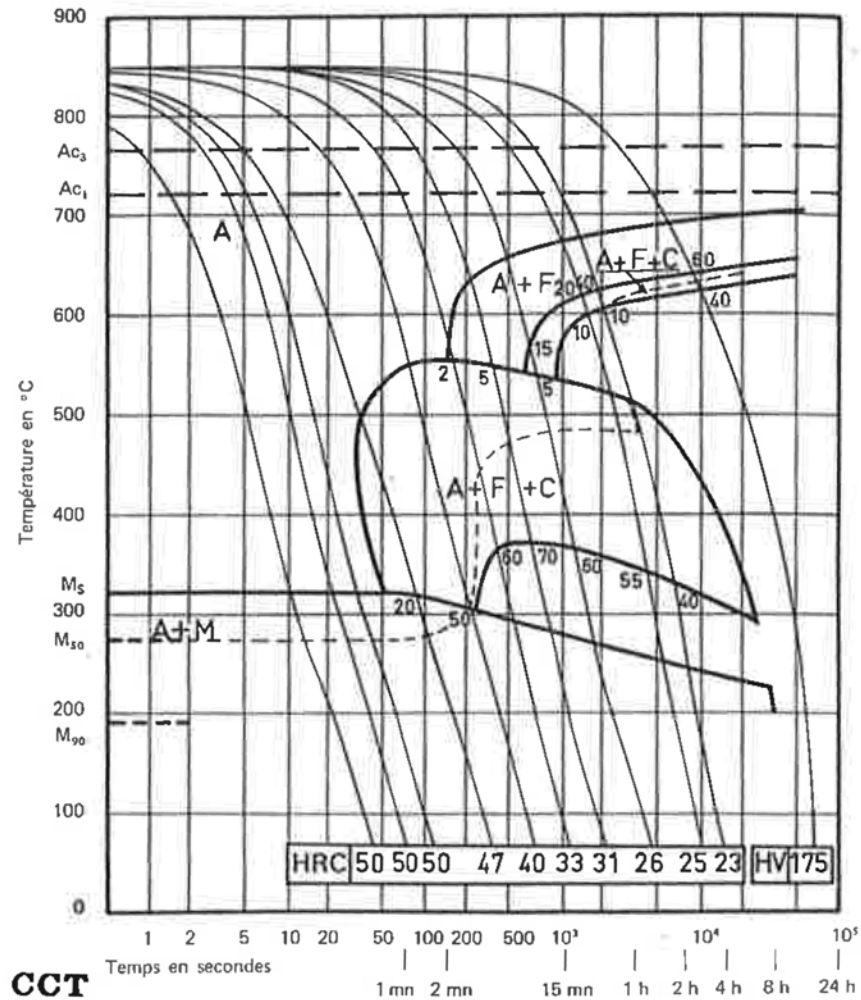


Fig. 28. Courbes de refroidissement dans l'huile de ronds de divers diamètres (d'après l'atlas IRSID)

Marquez sur le diagramme TRC de l'acier 30 NC 11 (reproduit en plus grand ci-dessous) les temps auxquels les températures de 700, 500, 300 et 100°C sont atteintes à cœur et en surface du barreau pour une trempe à l'huile d'un barreau de diamètre 50 mm.

(4 points)

Composition: 0.32% C - 0.30% Mn - 0.20% Si - 0.008% S - 0.017% P - 2.95% Ni - 0.69% Cr - <0.10% Mo - 0.31% Cu <0.030% V - 0.06% W Grain size: 12 Austenitized at 850°C (1562°F) for 30 min



d - Quelle sera sa structure en chacun de ces deux endroits (cœur et surface) ?

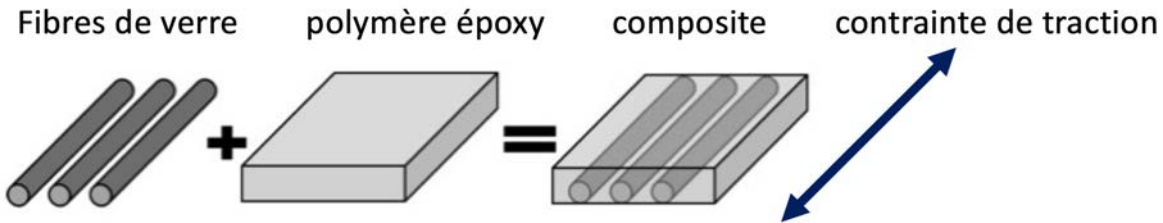
(3 points)

Réponse :

28 – Considérons un composite à fibres longues composé de

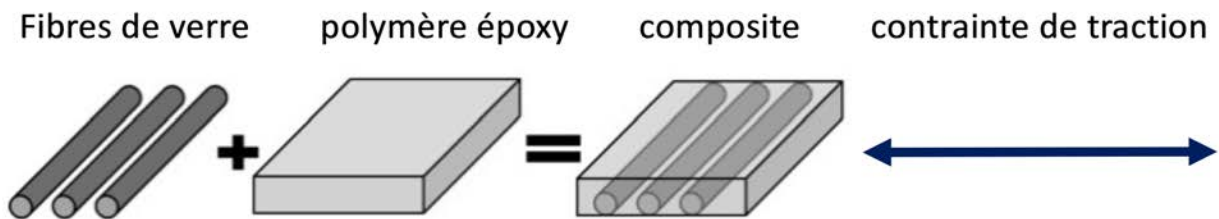
- 25% par volume de fibres de verre longues, de module d'Young $E = 70$ GPa, toutes parallèles et de :
- 75% par volume d'une matrice polymérique de module d'Young $E = 5$ GPa puis ayant une contrainte d'écoulement constante $\sigma = 50$ MPa lorsque son allongement ε excède 1.5%.

a – Quel est le module d'Young du composite selon la direction parallèle aux fibres ?
(3 points)



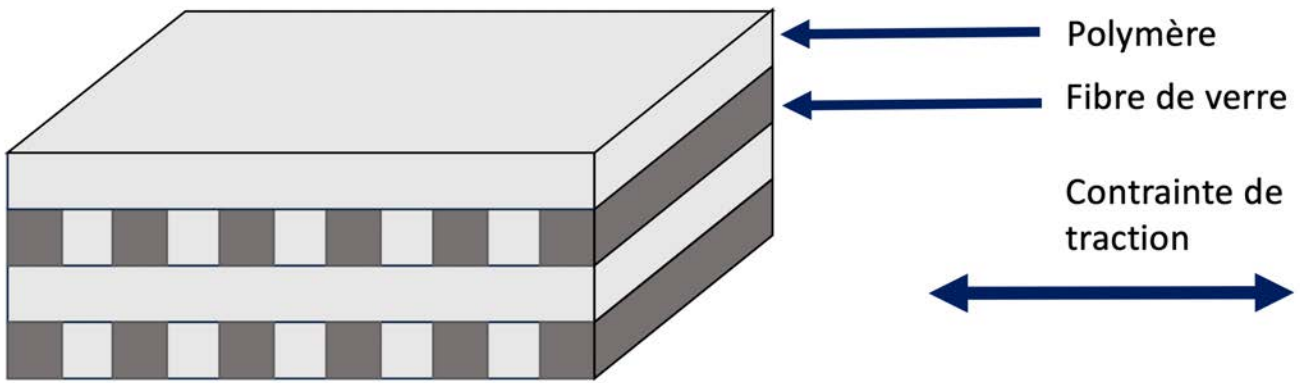
Réponse :

On va maintenant estimer le module d'Young du composite dans la direction perpendiculaire aux fibres :



Pour cela on va assimiler le composite à un assemblage de couches successives alternant

- une couche d'époxy pur dont la fraction volumique est V_{1E} et
- une couche de composite fait de 50% par volume de fibres de verre à section carrée, séparées par 50% par volume de fibres identiques d'époxy, comme dessiné ci-dessous :



b – Quelle est au sein de cette microstructure modèle du composite la fraction volumique V_{IE} des couches composées uniquement d'époxy pur ?

(2 points ; explicitiez votre réponse pour avoir tous les points)

Réponse :

c - En combinant les lois des mélanges isodéformation et isocontrainte pour la structure décrite ci-dessus, pouvez-vous estimer le module d'Young du composite selon la direction perpendiculaire aux fibres ?

(6 points)

Réponse :

d – Que prédit la loi des mélanges isocontrainte si on l'utilise pour estimer le module d'Young du composite selon la direction perpendiculaire aux fibres et quel commentaire pouvez-vous faire concernant la différence entre cette valeur et l'estimation produite avec le modèle ci-dessus (combinaison des lois des mélanges isodéformation et isocontrainte décrite ci-dessus) ?

(4 points)

Réponse :

**PAGE SUPPLEMENTAIRE POUR LE CAS OÙ VOUS AVEZ BESOIN DE DAVANTAGE DE PLACE
POUR REpondre.
INDIQUEZ CLAIREMENT SOUS LE TEXTE DE LA QUESTION QU'IL FAUT SE RENDRE EN
DERNIERE PAGE POUR EN LIRE LA REponse COMPLETE**

