

Le facteur critique d'intensité de contrainte en déformation plane est également important. Si, au lieu de sialon, on utilise du Si_3N_4 avec une valeur du facteur critique de $3,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, on peut démontrer par calcul que le contrôle par ultrasons impose une épaisseur minimale de 14,2 mm et que la contrainte maximale est de seulement 165,5 MPa.

7-3 Caractéristiques microstructurales d'une rupture dans les matériaux métalliques

Rupture ductile La rupture ductile apparaît normalement de façon **transgranulaire** (à travers les grains) pour les métaux qui ont de bonnes ductilité et ténacité. On constate souvent une grande déformation – comprenant de la striction – au sein du composant cassé. La déformation se produit avant la rupture finale. Les ruptures ductiles sont généralement causées par de simples surcharges ou par une contrainte trop élevée appliquée au matériau.

Lors d'un simple essai de traction, la rupture ductile commence par la nucléation, la croissance et la coalescence de microvides près du centre de l'éprouvette (Figure 7-5). Des **microvides** se forment lorsque des contraintes élevées causent la séparation du métal entre les grains ou aux interfaces entre le métal et de petites particules d'impuretés (inclusions). Quand les contraintes locales augmentent, les microvides croissent et coalescent en de plus grandes cavités. L'aire de contact métal-métal devient trop petite pour résister à la charge et la rupture se produit.

La déformation par glissement contribue également à la rupture ductile d'un métal. Le glissement se produit quand la contrainte de cisaillement appliquée atteint la contrainte de cisaillement critique et que les contraintes de cisaillement sont maximales à un angle de 45° par rapport à la contrainte de traction appliquée (Chapitre 4, Loi de Schmid).

Ces deux aspects d'une rupture ductile donnent un faciès caractéristique à la surface de rupture. Dans le cas de métaux épais, on peut s'attendre à trouver des traces de striction avec une grande partie de la surface de rupture ayant une surface plane où les microvides ont nucléé et coalescé, et une petite lèvre de cisaillement là où la surface forme un angle de 45° avec la direction de la contrainte appliquée. La lèvre de cisaillement, indiquant qu'un glissement s'est produit, mène à l'apparition d'une surface de rupture «cône et cratère» (Figures 6-7 et 7-6). Une simple observation macroscopique de cette rupture peut suffire à identifier le mode ductile de la rupture.

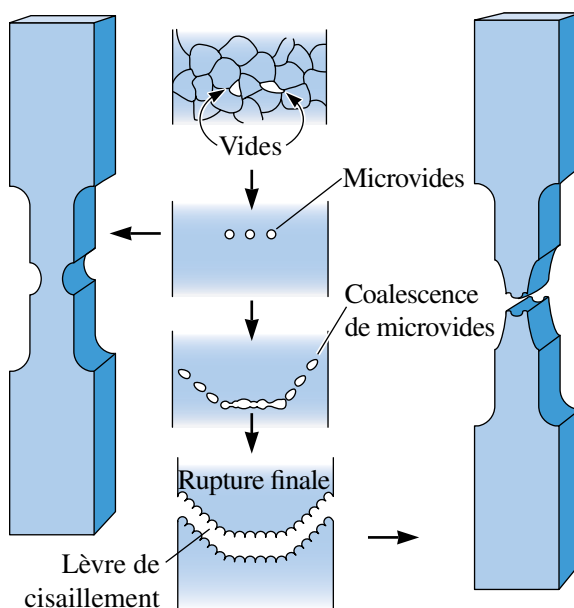


Figure 7-5 Quand un matériau ductile est étiré lors d'un essai de traction, la striction commence et des vides se forment – d'abord proches du centre de l'éprouvette – par nucléation entre les grains ou les inclusions. Lorsque la déformation continue, une lèvre de cisaillement présentant un angle de 45° par rapport à la direction d'application de la contrainte peut se former, produisant une surface de fracture en forme de cône et de cratère.

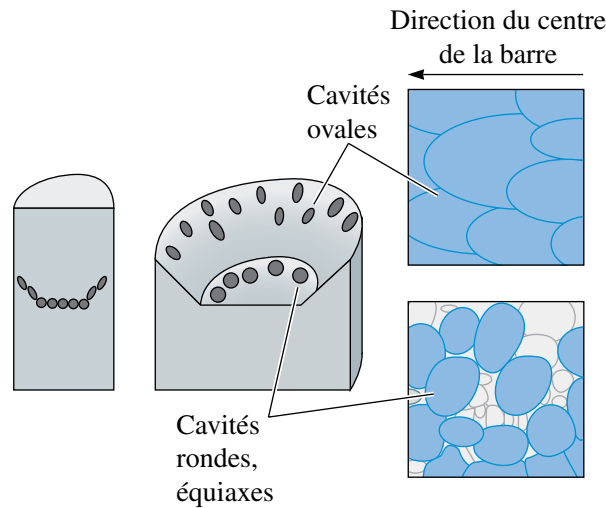


Figure 7-6 Formation des cavités lors de la rupture ductile. Des cavités équiaxes se forment au centre où les microvides croissent. Des cavités allongées, pointant en direction de l'origine de la rupture, se forment sur la lèvre de cisaillement.

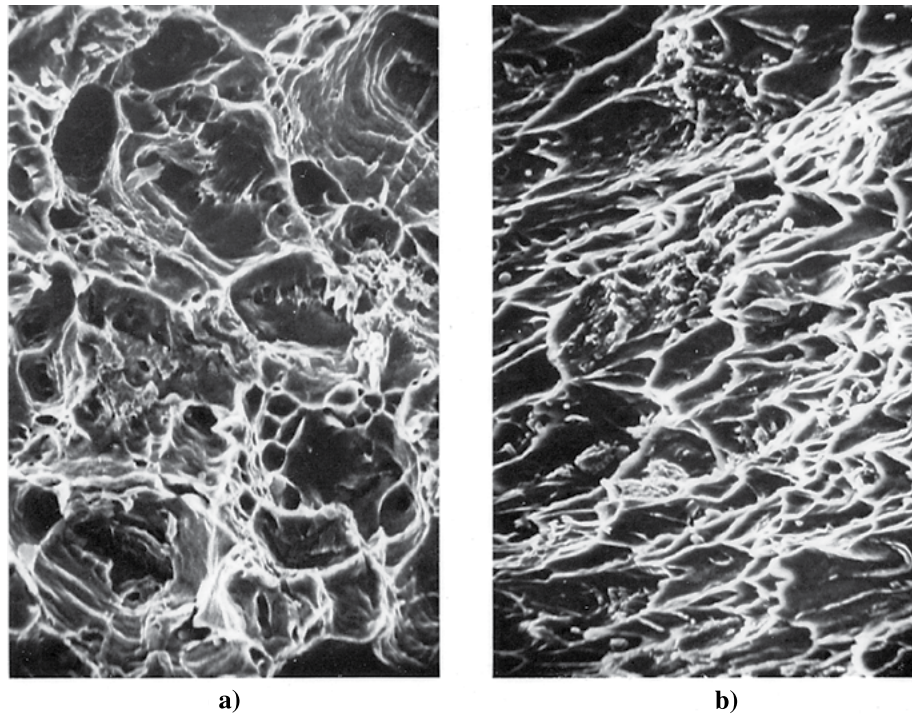


Figure 7-7 Image par microscopie électronique à balayage d'un acier recuit 1018 manifestant une rupture ductile lors d'un essai de traction. a) Cavités équiaxes au centre du cône et du cratère. b) Cavités allongées à la lèvre de cisaillement ($\times 1250$). [Avec l'autorisation de Don Askeland.]

L'observation de la surface de rupture à très fort grossissement – en utilisant un microscope électronique à balayage par exemple – révèle une surface alvéolée (Figure 7-7). Les cavités indiquent les traces des microvides produits lors de la rupture. Normalement, ces microvides sont ronds ou équiaxes quand une contrainte de traction normale produit la rupture (Figure 7-7 a); cependant, à la lèvre de cisaillement, les cavités sont de forme ovale ou allongée et les extrémités pointent en direction de l'origine de la rupture (Figure 7-7 b).

Dans le cas d'une plaque fine, on observe moins de striction et la surface de rupture entière peut être accidentée. Une observation microscopique de la surface montre des cavités allongées plutôt qu'équiaxes, indiquant une proportion de glissement à 45° plus importante que dans des échantillons de métaux plus épais.

Exemple 7-4 Analyse de la rupture d'un palan à chaîne

Une chaîne utilisée pour monter une lourde charge se rompt. L'examen de la chaîne cassée indique qu'il y a eu une déformation considérable et de la striction avant la rupture. Donnez quelques raisons possibles de la rupture.

SOLUTION

Cette description suggère que la chaîne s'est rompue de manière ductile à cause d'une simple surcharge. Deux raisons peuvent causer cette rupture :

1. La charge a dépassé la capacité de la chaîne. Ainsi, la contrainte due à la charge a dépassé la résistance à la traction ultime de la chaîne, entraînant ainsi la rupture. Comparer la charge aux spécifications du fabricant indiquera si la chaîne était conseillée pour une charge aussi élevée. C'est la faute de l'utilisateur !
2. La chaîne avait une mauvaise composition ou avait subi un traitement thermique inadéquat. En conséquence, la limite d'élasticité était plus faible que prévue par le fabricant et ne pouvait pas supporter la charge. Cela pourrait être la faute du fabricant !

Rupture fragile La rupture fragile se produit au sein des métaux et alliages ayant une résistance mécanique élevée ou une faible ductilité et une faible ténacité. De plus, même les métaux normalement ductiles peuvent se rompre de manière fragile à basse température, dans une section épaisse, à d'importantes vitesses de déformations (comme dans le cas des chocs), ou quand les défauts jouent un rôle important. Les ruptures fragiles sont observées fréquemment quand un choc, plutôt qu'une surcharge, cause la rupture.

Lors d'une rupture fragile, on n'observe quasiment aucune déformation plastique. La rupture commence généralement au sein d'un léger défaut qui induit une concentration de contrainte. La fissure peut se propager dans le métal à une vitesse approchant la vitesse du son. Généralement, la fissure se propage plus facilement le long de plans cristallographiques spécifiques, souvent les plans $\{100\}$, par clivage. Dans certains cas, la fissure peut cependant prendre un chemin **intergranulaire** (le long des joints de grains), particulièrement quand la ségrégation (séparation préférentielle de différents éléments) ou la présence d'inclusions affaiblit les joints de grains.

On reconnaît la rupture fragile en observant les caractéristiques de la surface de rupture. Généralement, la surface de rupture est plate et perpendiculaire à la contrainte appliquée lors d'un essai de traction. Si la rupture se produit par clivage, chaque grain cassé est plat et orienté de façon différente, ce qui donne une apparence cristalline ou de « sucre candi » à la surface de rupture (Figure 7-8). Souvent, un néophyte va penser que le métal s'est rompu parce qu'il a cristallisé. Bien sûr, on sait que le métal était déjà cristallin initialement et que l'apparence de la surface est due au clivage.

Une autre caractéristique courante de ce type de rupture est la **disposition en chevrons** (Figure 7-9), produite par des fissures différentes se propageant à des niveaux différents dans le matériau. Un motif de marques ou de crêtes radiales se propage depuis l'origine de la fissure (Figure 7-10). La disposition en chevrons est visible à l'œil nu ou avec une loupe et aide à identifier la nature fragile de la rupture ainsi que son origine.

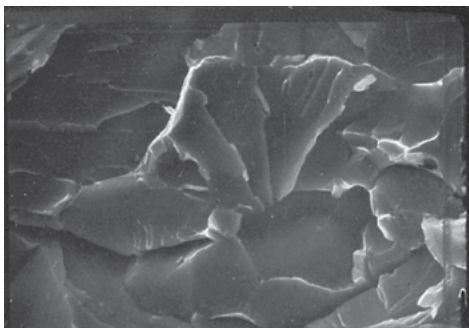


Figure 7-8 Image obtenue par microscopie électronique à balayage d'une surface de rupture fragile dans un acier trempé 1010. (Avec l'autorisation de C.W. Ramsay.)

5 μm



Figure 7-9 Motif en chevrons dans un échantillon d'acier trempé 4340 de 1 cm de diamètre. L'acier s'est rompu de manière fragile au cours d'un choc. (Avec l'autorisation de Don Askeland.)

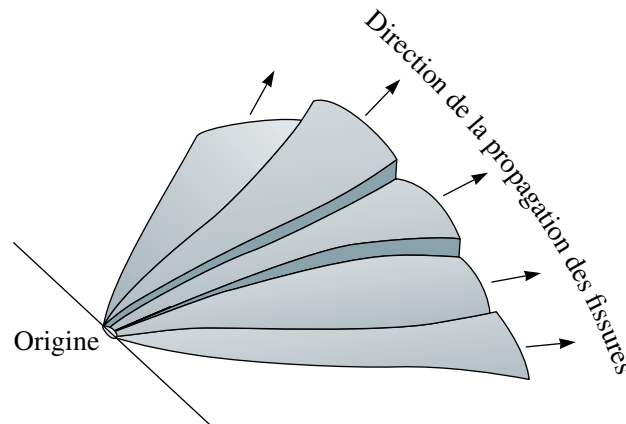


Figure 7-10 Formation d'un motif en chevrons lorsque la fissure se propage depuis l'origine à différents niveaux. Le motif pointe vers l'origine.

Exemple 7-5 Analyse de la rupture d'un essieu automobile

Un ingénieur enquêtant sur la cause d'un accident de voiture découvre que la roue arrière droite s'est détachée de l'essieu. L'essieu est plié. La surface de rupture révèle un motif en chevrons pointant vers la surface de l'essieu. Suggérez une cause de rupture possible.

SOLUTION

Les preuves suggèrent que l'essieu n'était pas cassé avant l'accident. La déformation de l'essieu signifie que la roue était encore fixée lorsque la charge a été exercée. La disposition en chevrons indique que la roue a été soumise à un choc intense qui a été transmis à l'essieu. Les preuves préliminaires suggèrent que le conducteur a perdu le contrôle et percuté quelque chose et que la force du choc a causé la rupture de l'essieu. Une enquête plus approfondie de la surface de rupture, de la microstructure, de la composition et des propriétés de l'essieu permettrait de vérifier si l'essieu a été fabriqué correctement.

7-4 Caractéristiques microstructurales d'une rupture dans les céramiques, les verres et les composites

Dans le cas de matériaux céramiques, les liaisons ioniques ou covalentes ne permettent pas ou très peu de glissement des plans cristallins. En conséquence, la rupture est fragile. La plupart des céramiques cristallines se rompent par clivage le long de plans denses très espacés. La surface de rupture est généralement lisse et ne comporte souvent pas de motif caractéristique pointant vers l'origine de la rupture (Figure 7-11 a).

Les verres se rompent également de manière fragile et on y constate souvent une surface de **rupture conchoïdale**. Cette surface présente une zone plane tout près de l'origine de la rupture et des lignes de déchirement sur le reste de la surface (Figure 7-11 b). Les lignes de déchirement pointent en direction de la zone lisse et de l'origine de la fissure, un peu comme la disposition en chevrons dans les métaux.

Exemple 7-8 Détermination des paramètres du module de Weibull

Sept échantillons de carbure de silicium ont été testés et présentent les résistances à la rupture suivantes : 23, 49, 34, 30, 55, 43 et 40 MPa. Estimez le module de Weibull pour ces données à l'aide de l'équation 7-11. Discutez de la fiabilité des céramiques.

SOLUTION

On peut remarquer que tout type d'analyse statistique nécessite un grand nombre d'échantillons. Sept échantillons ne sont pas suffisants. Le but de cet exemple est d'illustrer le calcul.

Une façon simple mais pas très précise de déterminer le comportement de la céramique est de classer les échantillons par ordre croissant de résistance. On attribue le numéro 1 à la céramique présentant la plus faible résistance, le numéro 2 à la céramique présentant la deuxième plus faible résistance, et ainsi de suite. Le nombre total d'échantillons est n (dans ce cas-ci, 7). La probabilité de rupture F est alors le numéro divisé par $n + 1$ (dans ce cas-ci, 8). On peut alors tracer $\ln\{\ln 1/[1 - F(V_0)]\}$ en fonction de $\ln \sigma$. Le tableau suivant et la figure 7-14 montrent le résultat de ces calculs. Remarquez que l'échelle du graphique pour σ est logarithmique.

Numéro d'échantillon	σ (MPa)	$F(V_0)$	$\ln\{\ln 1/[1 - F(V_0)]\}$
1	23	$1/8 = 0,125$	-2,013
2	30	$2/8 = 0,250$	-1,246
3	34	$3/8 = 0,375$	-0,755
4	40	$4/8 = 0,500$	-0,367
5	43	$5/8 = 0,625$	-0,019
6	49	$6/8 = 0,750$	+0,327
7	55	$7/8 = 0,875$	+0,732

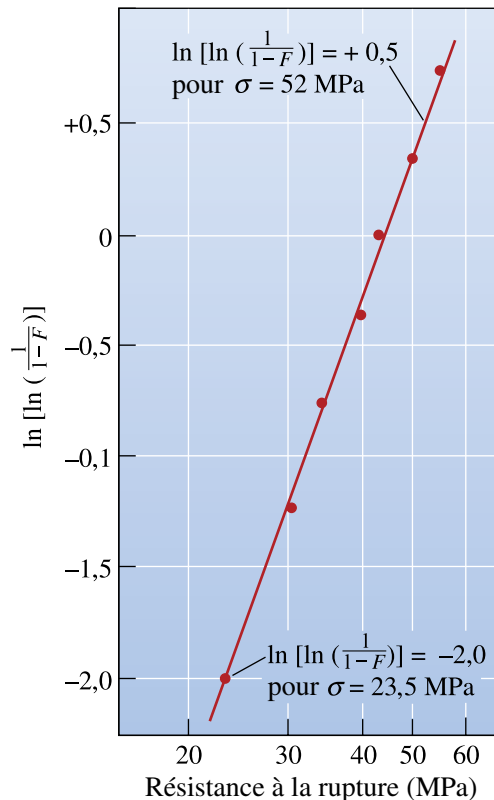


Figure 7-14 Probabilité de rupture cumulée en fonction de la résistance à la rupture. Remarquez que l'axe des x est logarithmique.

Exemple 7-12 Analyse de la rupture d'un tuyau

Un tuyau de titane utilisé pour transporter un produit corrosif à 400 °C se rompt après plusieurs mois d'utilisation. Comment détermineriez-vous la cause de la rupture?

SOLUTION

Comme une certaine période à haute température a été nécessaire avant que la rupture ne se produise, on peut envisager qu'un mécanisme de fluage ou de corrosion sous contrainte soit à l'origine de la rupture. Une observation microscopique du matériau proche de la surface de rupture serait recommandée. Selon la morphologie de la fissure, on pourra envisager deux causes à cette rupture. Si l'on observe une arborescence de fissures près de la surface de rupture, la défaillance est probablement due à de la corrosion sous contrainte. Si les grains proches de la rupture sont déformés, allongés et présentent beaucoup de vides à leurs interfaces, la défaillance est probablement due à du fluage.

Les verres inorganiques de silicate sont particulièrement sujets à la rupture lorsqu'ils sont en contact avec de la vapeur d'eau. La résistance des fibres de silice ou des produits faits de verre de silice est très élevée lorsque ces matériaux sont protégés de la vapeur d'eau. Quand les fibres ou les composants en verre de silice sont exposés à la vapeur d'eau, une réaction de corrosion s'amorce, menant à la formation de défauts de surface qui, à terme, causent la propagation des fissures lorsqu'une contrainte est appliquée. Pour les verres neufs, des traitements thermiques spéciaux comme la trempe permettent de les empêcher de réagir avec la vapeur d'eau. La trempe produit une contrainte totale compressive à la surface du verre. Ainsi, même si la surface du verre réagit avec la vapeur d'eau, les fissures ne se propagent pas, car la contrainte à la surface est compressive. Si on crée un défaut qui dépasse la région de contrainte compressive de la surface, le verre trempé va se briser. Le verre trempé est très utilisé dans le secteur de la construction et de l'automobile.

7-10 Évaluation du comportement en fluage

Pour déterminer les caractéristiques d'un matériau en fluage, une éprouvette chauffée est soumise à une contrainte constante lors d'un **essai de fluage**. Aussitôt que la contrainte est appliquée, l'éprouvette se déforme de façon élastique d'une petite quantité, ϵ_0 , (Figure 7-23) qui dépend de la contrainte appliquée et du module d'élasticité du matériau à haute température. Un essai de fluage peut aussi être effectué avec une charge constante. Ce type de mesure est important du point de vue de la conception technique.

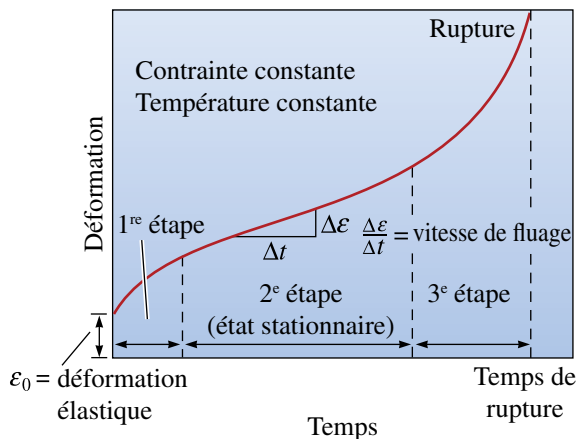


Figure 7-23 Courbe type de fluage montrant la déformation produite en fonction du temps pour une contrainte et une température constante.

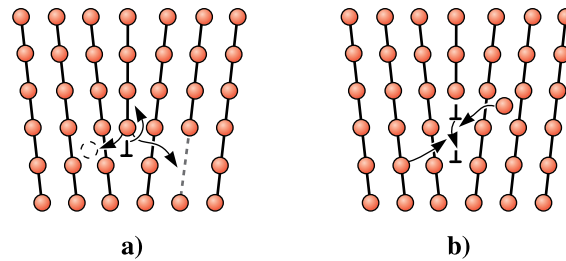


Figure 7-24 Les dislocations peuvent monter a) quand les atomes quittent la ligne de dislocation pour créer des atomes interstitiels ou pour combler des vides ou b) quand des atomes s'ajoutent à la ligne de dislocation en créant des vides ou en éliminant des atomes interstitiels.

Montée de dislocations De hautes températures permettent aux dislocations d'un métal de « monter ». Pour la **montée**, les atomes soit s'ajoutent, soit quittent la ligne de dislocation par diffusion, entraînant le mouvement de la dislocation dans une direction qui est perpendiculaire et non parallèle au plan de glissement (Figure 7-24). La dislocation s'échappe des imperfections du réseau, continue à glisser, et cause une déformation supplémentaire de la pièce, même sous une faible contrainte.

Vitesse de fluage et temps de rupture Lors d'un essai de fluage, la déformation ou l'allongement est mesuré en fonction du temps et tracé sous forme d'une courbe de fluage (Figure 7-23). Lors de la première étape du fluage des métaux, beaucoup de dislocations montent en s'éloignant des obstacles, glissent et contribuent à la déformation. Finalement, la vitesse à laquelle les dislocations s'éloignent des obstacles est égale à la vitesse à laquelle les dislocations sont bloquées par d'autres imperfections. Cela mène à la deuxième étape, ou état stationnaire, du fluage. La pente de la portion correspondant à l'état stationnaire de la courbe de fluage est la **vitesse de fluage** :

$$\text{Vitesse de fluage} = \frac{\Delta \text{ déformation}}{\Delta \text{ temps}} \quad (7-21)$$

Lors de la troisième étape du fluage, la striction commence et l'éprouvette se déforme à une vitesse accélérée jusqu'à la rupture. Le temps nécessaire pour que la rupture se produise est le **temps de rupture**. Une contrainte plus élevée ou une température plus élevée réduisent le temps de rupture et augmentent la vitesse de déformation (Figure 7-25).

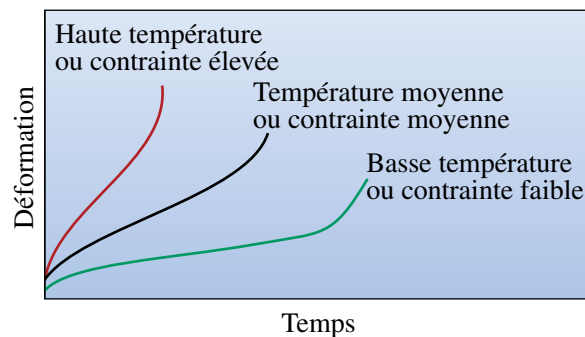


Figure 7-25 L'effet de la température ou de la contrainte appliquée sur la courbe de fluage.

La vitesse de fluage et le temps de rupture (t_r) suivent des relations qui prennent en compte les influences combinées de la contrainte et de la température :

$$\text{Vitesse de fluage} = C\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_f}{RT}\right) \quad (7-22)$$

$$t_r = K\sigma^m \exp\left(\frac{Q_r}{RT}\right) \quad (7-23)$$

où R est la constante des gaz parfaits, T est la température en kelvin et C , K , n et m sont des constantes du matériau. Q_f est l'énergie d'activation du fluage et Q_r est l'énergie d'activation de la rupture. En particulier, Q_f est reliée à l'énergie d'activation de diffusion lorsque la montée de dislocation est importante.

Pour des céramiques cristallines, d'autres facteurs tels que le glissement des joints de grains et la nucléation de microfissures sont particulièrement importants. Souvent, un matériau non cristallin ou vitreux est présent aux joints de grains ; l'énergie d'activation nécessaire pour que le verre se déforme est faible, entraînant des vitesses de fluage élevées en comparaison des céramiques complètement cristallines. Pour la même raison, le fluage se produit à une vitesse élevée dans les verres céramiques et les polymères amorphes.

7-11 Utilisation des données de fluage

Les **courbes contrainte-rupture**, montrées à la figure 7-26 a), permettent d'estimer la durée de vie d'un composant pour une valeur particulière de contrainte ou de température. Le **paramètre de Larson-Miller**, illustré à la figure 7-26 b), permet de regrouper l'influence de la température et de la contrainte sur le temps de rupture en utilisant une seule courbe. Le paramètre de Larson-Miller est donné par :

$$L.M. = \left(\frac{T}{1000}\right)(A + B \ln t) \quad (7-24)$$

où T est en Kelvin, t est le temps en heures et A et B sont des constantes du matériau.

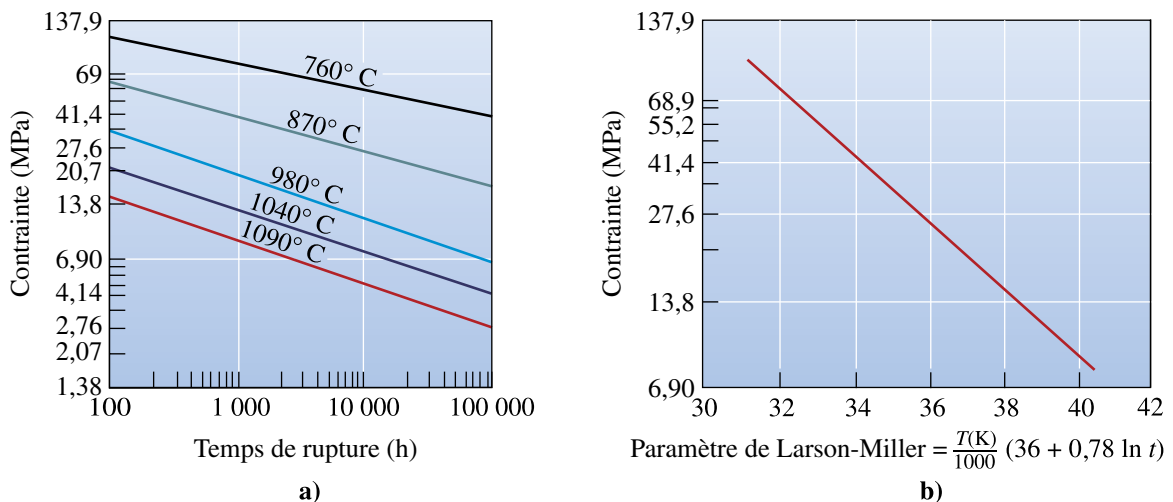


Figure 7-26 Résultats d'une série d'essais de fluage. a) Courbes contrainte-rupture pour un alliage fer-chrome-nickel ; b) paramètre de Larson-Miller pour une fonte ductile.

Propriétés mécaniques :

Partie 1

Vous êtes-vous déjà demandé...

- *Pourquoi la Silly Putty[®] peut être fortement déformée quand on la manipule doucement, mais se rompt lorsqu'on la déforme rapidement ?*
- *Pourquoi quatre tasses à café en céramique peuvent-elles supporter un camion de pompiers alors qu'elles se cassent en tombant simplement par terre ?*
- *Quels facteurs liés aux matériaux ont joué un rôle important dans le naufrage du Titanic ?*
- *Quels facteurs ont joué un rôle majeur dans l'accident de la navette spatiale Challenger en 1986 ?*

Objectifs d'apprentissage

- Identifier les caractéristiques principales d'une courbe contrainte-déformation de traction (module d'élasticité, limite d'élasticité, résistance à la traction, striction, contrainte à la rupture, déformation à la rupture, région élastique, région plastique, ténacité).
- Tracer une courbe contrainte-déformation à partir de la charge et du déplacement et calculer la ductilité de l'échantillon.
- Calculer les contraintes réelles et nominales ainsi que les déformations réelles et conventionnelles et expliquer pourquoi il existe deux systèmes de contrainte-déformation.
- Prévoir l'évolution des propriétés mécaniques d'un matériau lorsqu'il sera soumis à différentes températures et vitesses de déformation.
- Calculer la résistance à la flexion et le module d'élasticité en flexion d'un matériau soumis à un essai de flexion.
- Définir la dureté des matériaux et expliquer comment la mesurer à différentes échelles.
- Expliquer pourquoi les verres métalliques sont extrêmement durs, mais fragiles.

Plusieurs produits à la fine pointe de la technologie contiennent diverses formes de silice. Les systèmes de communication à fibres optiques sont constitués de minces fibres de verre de silice qui offrent un débit de transmission de données presque illimité par rapport aux câbles en cuivre conventionnels. La face de nombreux appareils à écran tactile, telles que les téléphones intelligents, est faite de verre spécialement trempé qui résiste très bien aux chocs. La microélectronique à base de silicium (circuits intégrés ou puces) repose en partie sur les propriétés électriques hautement spécifiques des couches ultraminces de dioxyde de silicium amorphe, dont certaines ne sont pas plus épaisses de quelques atomes.

Résumé

- Les céramiques sont des matériaux inorganiques non métalliques dont la dureté et la température de fusion sont élevées. Ces matériaux comprennent les céramiques monocristallines et polycristallines, les verres et les vitrocéramiques. Les céramiques sont généralement des isolants électriques et thermiques ayant une bonne stabilité chimique et une bonne résistance à la compression.
- Les céramiques jouent un rôle essentiel dans les technologies électroniques, magnétiques, optiques et liées à l'énergie. Les céramiques peuvent aussi être utilisées comme isolants thermiques. Parmi les usages de la céramique technique, notons les cartes de crédit, les boîtiers pour puces de silicium, les fibres optiques, les verres écoénergétiques et les verres blindés. Les céramiques traditionnelles servent de réfractaires pour la préparation et mise en forme des métaux et pour nombre d'utilisations grand public.
- Les céramiques cristallines contiennent des dislocations, mais la plupart des céramiques polycristallines ne se déforment pas plastiquement. Les défauts des matériaux céramiques, tels que les fissures et les pores, en déterminent les performances mécaniques. La porosité et les fissures limitent la capacité du matériau à résister à la traction.
- La céramique est généralement mise en forme par compactage et par frittage. Pour les applications spécialisées, on utilise le pressage isostatique, le pressage à chaud et le pressage isostatique à chaud (HIP), notamment pour atteindre des niveaux de densification plus élevés.
- Le coulage en bande, le coulage en barbotine, l'extrusion et le moulage par injection sont quelques-unes des autres techniques utilisées pour mettre en forme les céramiques crues. Ces procédés sont ensuite suivis d'une étape de combustion dans laquelle les liants et les plastifiants sont brûlés, et où la céramique résultante est frittée.
- Le dioxyde de silicium, également connu sous le nom de silice, et les silicates (composés à base de silice) présentent d'importantes applications industrielles sous leurs formes cristallines et amorphes. L'élément constitutif de ces matériaux est une unité moléculaire SiO_4 dont l'atome de silicium est situé au centre d'un tétraèdre d'atomes d'oxygène.

Glossaire

Barbotine (*slip*) Boue formée de poudre céramique et de liquide qui est versée dans un moule.

Céramique (*ceramic*) Solide inorganique non métallique, habituellement dur et cassant.

Céramique crue (*green ceramic*) Céramique qui a été façonnée dans une forme désirée, mais qui n'a pas encore été frittée.

Cermet (*cermet*) Composite céramique-métal (par exemple, WC-Co) fournissant une bonne combinaison de dureté avec d'autres propriétés telles que la ténacité.

Compactage (*compaction*) Application d'une pression sur une poudre de céramique à laquelle est additionnée un liant au sein d'une matrice pour créer une forme prédéfinie et éliminer la porosité d'une céramique crue.

Problèmes Chapitre 4

Section 4-1 Défauts ponctuels

- 4-1** L'or a $5,82 \times 10^8$ lacunes/cm³ à l'équilibre à 300 K. Quelle fraction des sites atomiques est vacante à 600 K ?
- 4-2** Calculez le nombre de lacunes par m³ pour l'or à 900 °C. L'énergie pour la formation de lacune est de 0,86 eV/atome.
- 4-3** Calculez le nombre de lacunes par cm³ pour le cuivre à 1080 °C (juste en dessous de la température de fusion). L'énergie pour la formation de lacune est de 83 680 J/mol.
- 4-4** La fraction des nœuds de réseau occupés par des lacunes dans l'aluminium solide à 660 °C est de 10^{-3} . Quelle est l'énergie nécessaire pour créer des lacunes dans l'aluminium ?
- 4-5** La masse volumique d'un échantillon de palladium CFC est de 1980 kg/m³ et son paramètre de maille est égal à 0,38902 nm. Calculez
a) la fraction des nœuds de réseau qui contiennent des lacunes ;
b) le nombre total de lacunes dans un centimètre cube de Pd.
- 4-6** La masse volumique d'un échantillon de béryllium HC est de 1844 kg/m³, et les paramètres de maille sont $a_0 = 0,22858$ nm et $c_0 = 0,35842$ nm. Calculez
a) la fraction des nœuds de réseau qui contiennent des lacunes ;
b) le nombre total de lacunes par centimètre cube de Be.
- 4-7** Le lithium CC a un paramètre de maille de 0,35089 nm et contient une lacune toutes les 200 mailles élémentaires. Calculez
a) le nombre de lacunes par centimètre cube ;
b) la masse volumique de Li.
- 4-8** Le plomb CFC a un paramètre de maille de 0,4949 nm et contient une lacune tous les 500 atomes de Pb. Calculez
a) la masse volumique ;
b) le nombre de lacunes par gramme de Pb.
- 4-9** Le Cu et le Ni forment une solution solide de substitution. Cela signifie que la structure cristalline d'un alliage Cu-Ni est constituée d'atomes de Ni remplaçant les atomes de Cu dans les positions atomiques régulières de la structure CFC. Pour un alliage Cu-30 % en %m de Ni, quelle fraction des sites atomiques le Ni occupe-t-il ?
- 4-10** Le Au et le Ag forment une solution solide de substitution. Cela signifie que la structure cristalline d'un alliage Au-Ag est constituée d'atomes de Ag remplaçant les atomes de Au dans les positions atomiques régulières de la structure CFC. Pour un alliage Au-50 %at Ag, quel est le %m d'Ag dans l'alliage ?
- 4-11** Un alliage de niobium est produit en substituant des atomes de tungstène dans la structure CC ; l'alliage produit a un paramètre de maille de 0,32554 nm et une masse volumique de 11 950 kg/m³. Calculez la fraction des atomes de tungstène dans l'alliage.
- 4-12** Les atomes d'étain sont introduits dans un cristal de cuivre CFC, produisant un alliage ayant un paramètre de maille de 0,37589 nm et une masse volumique de 8772 kg/m³. Calculez le pourcentage atomique d'étain présent dans l'alliage.
- 4-13** Dans un cristal de chrome CC, nous remplaçons 7,5 % des atomes de chrome (en pourcentage atomique) par du tantale. La diffraction par rayons X montre que le paramètre de maille est égal à 0,29158 nm. Calculez la masse volumique de l'alliage.
- 4-14** Supposons que nous introduisons un atome de carbone pour 100 atomes de fer dans une position interstitielle dans le fer CC, ce qui donne un paramètre de maille de 0,2867 nm. Trouvez la masse volumique et la compacité de cet acier.
- 4-15** La masse volumique du fer CC est de 7882 kg/m³, et le paramètre de maille est égal à 0,2866 nm lorsque des atomes d'hydrogène sont introduits aux positions interstitielles. Calculez
a) la fraction atomique des atomes d'hydrogène ;
b) le nombre moyen de mailles élémentaires contenant des atomes d'hydrogène.

Section 4-2 Autres défauts ponctuels

- 4-16** Supposons qu'un défaut de Schottky soit présent dans un dixième des mailles élémentaires de MgO. Le MgO a la même structure cristalline que le chlorure de sodium et un paramètre de maille de 0,396 nm. Calculez
a) le nombre de lacunes d'anions par cm³ ;
b) la masse volumique de la céramique.
- 4-17** ZnS a la structure blende de zinc. Si la densité est de 3020 kg/m³ et que le paramètre de maille est de 0,59583 nm, déterminez le nombre de défauts de Schottky,
a) par maille élémentaire ;
b) par centimètre cube.