

Elasticité :

Loi de comportement : - Elastique : $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl}$

- Plasticité par glissement : $\epsilon_{ij}^p = \sum_n R_{ij}^{(n)} \gamma$ avec $R_{ij}^{(n)} = \frac{1}{2}(m_i n_j + m_j n_i)$
 \vec{m} : direction de glissement, \vec{n} : normale au plan de glissement
 et γ : quantité de glissement

Les tenseurs $\underline{\underline{\sigma}}$ et $\underline{\underline{\epsilon}}$ sont symétriques donc $C_{ijkl} = C_{jikl}$ et $C_{ijkl} = C_{ijlk}$

Notation réduite de Voigt : 11->1, 22->2, 33->3, 32->4, 31->5, 12->6 (Ex : $C_{1111} = C_{11}$)

La loi de comportement devient : $\sigma_i = C_{ij} \cdot \epsilon_j$

C_{ij} est une matrice 6x6 symétrique (21 coef indépendants)

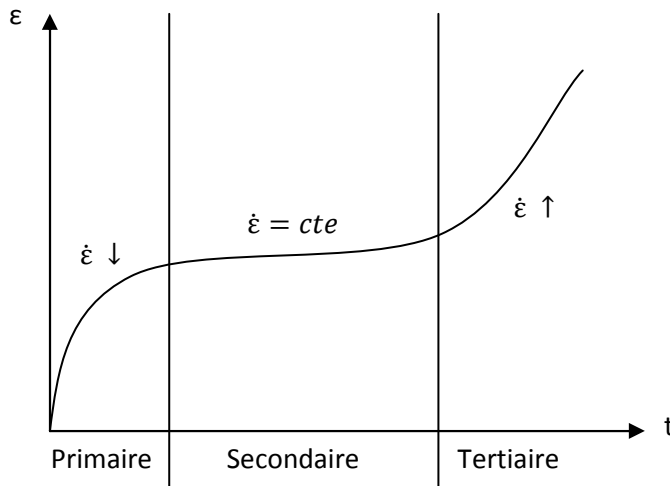
σ_i et ϵ_j sont des vecteurs colonnes

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{32} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \end{pmatrix}$$

Fluage :

Différents mécanismes en fonction de la température :

- A basse température ($T < 0,3 T_f$) : glissement de dislocations, faible déformation
- A température intermédiaire ($0,3 T_f < T < 0,5 T_f$) : glissement plastique et rupture
- A température élevée : ($T > 0,5 T_f$) : glissement aux joints de grains



Primaire : dislocation enchevêtrées

Secondaire : deux phénomènes antagonistes, création de dislocation (déformations) et restauration dynamique (annihilation des dislocations de signes opposés et réorganisation en cellules)

Tertiaire : formation de microfissures, puis fissures, puis rupture

Le temps à la rupture est fonction de $\dot{\epsilon}_{II}$: $\dot{\epsilon}_{II} = \frac{k}{t_r}$

$\dot{\epsilon}_{II}$ dépend aussi du niveau de contrainte appliquée : $\dot{\epsilon}_{II} = \left(\frac{\sigma}{k}\right)^m$

$$\dot{\epsilon}_{II} = \left(\frac{\sigma}{k}\right)^m \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) = \frac{k}{t_r}$$

$$\log(t_r) - \frac{\Delta H}{RT \ln(10)} = \log(B(\sigma)) = P_2$$

avec P_2 : paramètre de Sherby – Dorn (équivalence temps – température)

Définition du fluage :

Déformation lente d'un matériau qui se produit sous l'effet d'une contrainte constante à température constante. Dans les métaux, le fluage n'intervient généralement qu'à haute température. Le fluage à température ambiante, qui concerne surtout les matières plastiques, est appelé « fluage à froid » ou « déformation sous charge ». Les résultats d'un essai de fluage sont généralement présentés sous la forme d'une courbe en fonction du temps, à contrainte et température constantes. La pente de la courbe représente la vitesse de fluage et son point final représente l'instant de la rupture. Le fluage peut être décomposé en 3 étapes :

- Fluage primaire, commence à vitesse rapide et ralentit avec le temps, ce qui correspond à une augmentation de résistance du matériau. Elle correspond à un écrouissage : il y a création et propagation de dislocations jusqu'au joint de grain.
- Fluage secondaire s'effectue à vitesse relativement constante. Il comprend des phénomènes de diffusion et de dislocation au niveau inter-granulaire et intra-granulaire.
- Fluage tertiaire présente une accélération et s'achève avec défaillance du matériau à l'instant de rupture. Apparition d'un endommagement sensible à l'échelle mécanique ou d'un adoucissement du matériau

Pour que l'effet du fluage soit observable, il faut que $T > 0,3 T_f$.

Tenue en service :

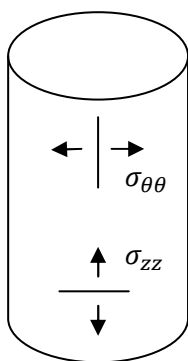
K_I : facteur d'intensité de contrainte, définit l'amplitude du champ de contraintes en tête de fissure, en fonction de la géométrie de la fissure et de la géométrie de la pièce, ainsi que de la contrainte appliquée. $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ pour une fissure de longueur $2a$, et une contrainte appliquée σ .

Clivage : Rupture des liaisons selon un plan perpendiculaire à la contrainte ($\sigma_{\text{clivage}} \approx E/10$)

K_{Ic} : Valeur critique du facteur d'intensité de contrainte = Tenacité données intrinsèques au matériau)

$K_I < K_{Ic}$: propagation lente

$K_I = K_{Ic}$: rupture brutale



Les fissures verticales se propagent en mode I sous l'effet de $\sigma_{\theta\theta}$.

Les fissures horizontales se propagent sous l'effet de σ_{zz} .

Ex : Si $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz}$, alors les fissures verticales se propagent plus vite que les fissures horizontales.



Cristallographie :

Directions denses : CC $\langle 111 \rangle$ (8 directions) ; CFC $\langle 110 \rangle$ (12 directions)

Plans denses : CC $\{110\}$ (6 plans) ; CFC $\{111\}$ (4 plans)

Pour déterminer les plans pour les cubiques :

- $h, k, l > 0$ + permutations circulaires
- $h < 0$ et $k, l > 0$ + permutations circulaires

- $k < 0$ et $h, l > 0$ + permutations circulaires
- $l < 0$ et $h, k > 0$ + permutations circulaires

$$\rho = \frac{Mn}{a^3 N_a} \text{ avec } M : \text{masse molaire}, n : \text{nombre d'atomes par maille},$$

$$a : \text{paramètre de maille}, N_a : \text{nombre d'Avogadro}$$

Traitements thermiques :

Le but des traitements thermiques est d'adapter la microstructure aux caractéristiques mécaniques recherchées. Dans le cas des aciers, les TTh ont lieu en deux étapes principales :

- l'austénitisation : structure 100 % γ
- deux types de refroidissements possibles :
 - Trempe suivi d'un maintien isotherme (diagramme TTT)
 - Refroidissement à vitesse constante (diagramme TRC)

Ce premier traitement peut être suivi d'un revenu qui vise à relaxer une partie des contraintes thermiques.

A_{c1} : température de début de transformation de perlite en γ .

A_{c3} : température de fin de transformation en γ .

Nombre de grains/mm² : $m = 8.2^G$ (G : voir diapositive 22 chapitre I)

Traitements superficiels :

Objectif des ces traitements :

- Obtenir une dureté plus élevée en surface + contraintes résiduelles de compression
- Conserver de la ductilité à cœur

Différents traitements possibles :

- Mécanique : grenailage, sablage, ... (écrouissage)
- Thermique : austénitisation + trempe localisée en surface (transformation martensitique)
- Thermochimique : cémentation (=> martensite), nitruration (précipitation), carbonitruration
- Revêtements

Cémentation : enrichissement en C de la surface à haute température de manière à décaler ses températures de début de transformation martensitique (abaissement) => la surface se transforme après le cœur de la pièce => contraintes résiduelles de compression en surface + durcissement de la martensite (% C augmenté).

Nitruration : enrichissement en N de la surface à température ambiante.

$c = m/V$

$$1^{\text{ère}} \text{ loi de Fick : } J = \frac{1}{s} \frac{dm}{dt} = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

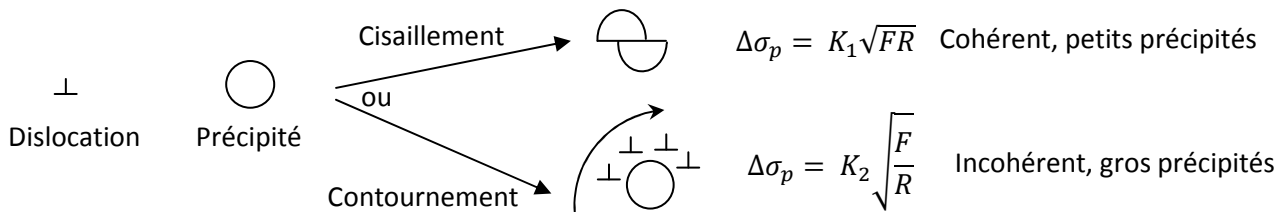
$$2^{\text{ème}} \text{ loi de Fick : } \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Solution analytique (cas semi-infini) : $\frac{c-c_e}{c_0-c_e} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ avec $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$

$$Rq : \text{Si } f(x) = \int_a^b g(u)du \text{ alors } \frac{\partial f}{\partial x} = g(b) \frac{\partial b}{\partial x} - g(a) \frac{\partial a}{\partial x}$$

Traitement thermique des alliages d'aluminium :

Durcissement : augmentation de la limite d'élasticité = augmentation de la contrainte appliquée pour activer le glissement des dislocations.



R : rayon moyen des précipités, F : fraction volumique occupée par les précipités.

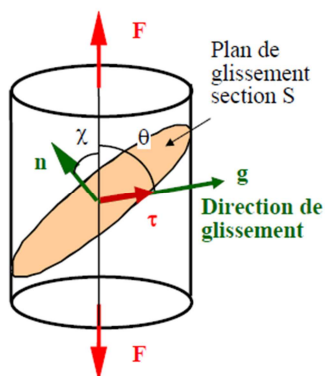
Mode de durcissement des alliages métalliques :

- Ecrouissage
- Transformation martensitique (aciers)
- Affinement de la taille de grain (Hall Petch)
- Solution solide
- précipitation

Loi de comportement des matériaux :

Cission critique de glissement : $\tau = \sigma_0 \cos \theta \cos \chi$

Facteur de Schmid : $F_S = \cos \theta \cos \chi$



χ : Angle entre la normale au plan de glissement (= plan dense) et la contrainte appliquée.

θ : Angle entre la direction de glissement (= direction dense) et la contrainte appliquée.

Dans les cubiques $[h k l]$ est orthogonal à $[h k l]$.

On calcule $\cos \theta$ et $\cos \chi$ grâce au produit scalaire :

$$\cos \chi = \frac{[h k l] \cdot [h' k' l']}{\| [h k l] \| \| [h' k' l'] \|}$$

avec $[h k l] = \vec{n}$

et $[h' k' l']$ le vecteur directeur de la contrainte appliquée

Les systèmes de glissements activés ont le facteur de Schmid le plus élevé.

Divers :

Durcissement structural :

- Chauffage à une température suffisamment élevée pour mettre les éléments d'addition en solution solide,
- Trempe ou refroidissement rapide pour maintenir la solution solide sursaturée à température ambiante,
- Durcissement (précipitation) par maturation (vieillissement) à température ambiante ou par revenu.

Les trois différentes classes de comportement sont :

- Élastique, modèle rhéologique : un ressort, $\sigma = E \varepsilon$
- Viscosité, modèle rhéologique : un amortisseur, $\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$
- Plastique, modèle rhéologique : patin à frottement sec, Si $\sigma < \sigma_y$, alors $\varepsilon = 0$, Si $\sigma > \sigma_y$, alors $\varepsilon \neq 0$.

Traitement de vieillissement :

La baisse de température retarde le durcissement. Le durcissement augmente avec la température de traitement. Il existe une température maximale de traitement au-delà de laquelle le durcissement maximal diminue. Il n'y a pas de durcissement à haute température.

Loi de Bragg : $2d_{hkl} \sin \theta = \lambda$ avec $d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}$

La DRX permet de :

- Déterminer la composition des phases par analyse des réseaux cristallins
- Analyser les contraintes résiduelles
- Analyser la texture d'un matériau

La tenacité est le travail par unité de volume nécessaire pour provoquer la rupture d'un matériau.