

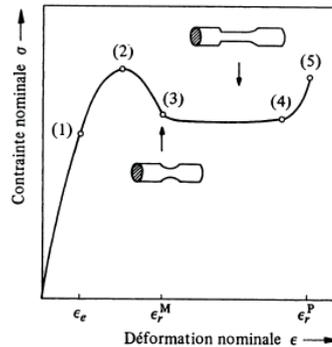
DEFORMATION PLASTIQUE ET VISCOELASTIQUE

G. Moulin

I/ DEFORMATION PLASTIQUE

I 1/ Comportement en déformation plastique des métaux

L'allure de la courbe de traction des métaux et alliages présentée montre les divers domaines élastique et plastique jusqu'à la rupture qui intervient à la fin de la striction (cf cours sur la traction). Dans le cas des polymères thermoplastiques, il y a aussi une diminution de la contrainte apparente à la striction mais la résistance du matériau augmente alors car les chaînes s'orientent dans le sens de la traction.

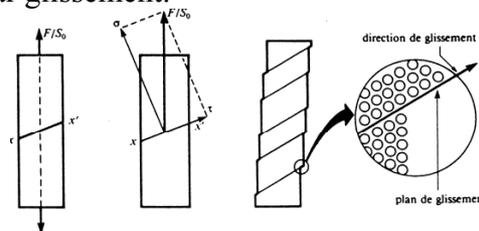


Courbe de traction d'un polymère thermoplastique. Les points (1) et (2) désignent respectivement la limite d'élasticité et la résistance maximale. La rupture se produit au point (5) dans le cas de ces polymères sollicités

I 1 1/ Mécanismes mis en jeu en déformation plastique des métaux

I 1 1 1/ Déformation par glissement

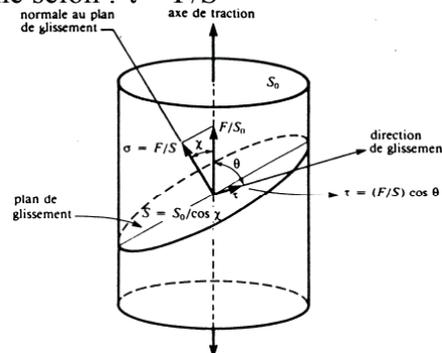
Le mécanisme mis en jeu est par exemple décrit sur la figure ci-dessous dans le cas du monocristal se déformant par glissement.



Représentation schématique du mécanisme de glissement dans le cas du monocristal

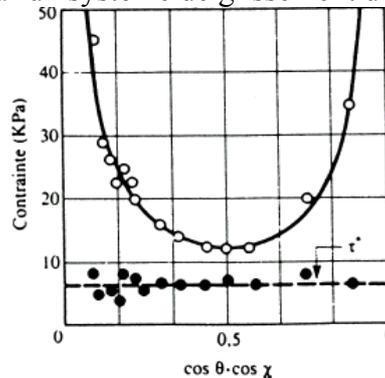
1/ Cas du monocristal

Dans un plan déterminé S d'un monocristal, la contrainte de cisaillement qui est induite par une force de traction s'exprime selon : $\tau = F/S$



Mise en évidence de la composante tangentielle de la force, F, au plan de glissement au début de la force de traction.

Si θ est l'angle entre la direction de glissement et l'axe de traction et χ l'angle entre la normale au plan de glissement et la direction de traction, on peut écrire : $\tau = \sigma (\cos\chi \cdot \cos\theta)$
 Cette équation correspond à la loi de Schmid. Le terme $\cos\chi \cos\theta$ est le facteur de Schmid et la loi permet de relier σ et τ pour un système de glissement donné.



La contrainte de cisaillement τ dans un matériau passe par une valeur maximale sur les plans à 45° de l'axe de traction ($s = \text{constante}$). Pour ce cas, la direction de glissement, la normale au plan de glissement et l'axe de traction sont coplanaires.

Pour une même contrainte de traction σ , la valeur maximale de la contrainte de cisaillement τ est atteinte lorsque le facteur de Schmid est égal à 0.5, soit $\tau = 0.5\sigma$

Les plans à haute densité d'atomes et les directions de glissement préférentielles constituent les systèmes de glissement. Ces systèmes sont signalés ci-dessous selon la structure du cristal:

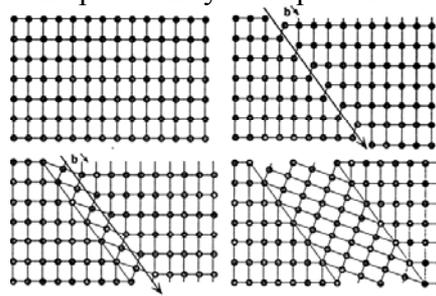
- pour la structure CFC, le système : $\langle 110 \rangle \{111\}$
- pour la structure CC, le système : $\langle 111 \rangle \{110\}$ ou $\langle 111 \rangle \{112\}$
- pour la structure HC, le système : $\langle 1120 \rangle \{0001\}$

2/ Cas du polycristal

Dans le cas du polycristal, les systèmes de glissement peuvent s'activer diversement selon l'orientation cristalline, avec un blocage de grains à grains au niveau des joints de grains.

I 1 12/ Déformation par maclage

Une autre déformation correspond au basculement d'une partie du cristal sous l'action d'une contrainte de cisaillement dans une position symétrique sans changement de la structure.



Mécanisme de déformation plastique par maclage (basculement d'une partie du réseau dans une position symétrique).

Les plans de clivage sont signalés dans le tableau .

	cisaillement	plan de macle
cubique à faces centrées	$1/6\langle 112 \rangle$	$\{111\}$
cubique centré	$1/6\langle 111 \rangle$	$\{112\}$
hexagonal	$1/12\langle 10\bar{1}1 \rangle$	$\{10\bar{1}2\}$

Plans facilités en glissement et en maclage selon la structure cristallographique.

I 1 1 3/ Rôle des dislocations dans le mécanisme de déformation.

Le cas du glissement sera seul traité car il correspond à un phénomène plus fréquemment rencontré avec mouvement des dislocations. Soit une densité ρ_m de dislocations coins mobiles parallèles qui parcourent une distance Δx , la déformation par cisaillement γ s'écrit : $\gamma = \rho_m b \Delta x$ ce qui conduit à la vitesse de déformation : $\dot{\gamma} = d\gamma/dt = b d(\rho_m \Delta x)/dt$ (b = vecteur de Burger)
Par ailleurs, la vitesse de déplacement des dislocations est fonction de la contrainte de cisaillement τ : $v = (\tau/C)^n$ (n et C = constantes caractéristiques) :

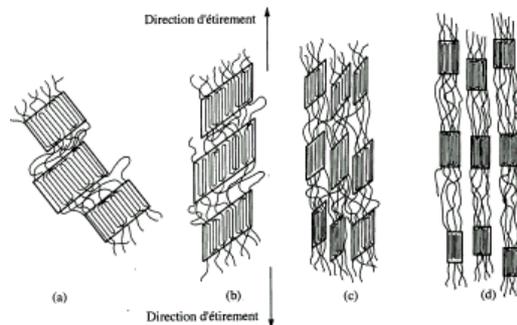
$$\dot{\gamma} = \rho_m b (\tau/C)^n \quad \text{où } n \text{ varie suivant la nature du matériau.}$$

Pour les matériaux à liaison covalentes polaires et certains métaux cc, n est plus petit que 20.

Dans le cas des métaux cfc, n peut être compris entre 100 et 200.

I 2/ Comportement en déformation plastique des polymères thermoplastiques ductiles

Il y a déplacement et réorientation des différents éléments structuraux : segments de chaîne et lamelles cristallines. La majorité des polymères semi-cristallins cristallisent en sphérolithes..



Modélisation de la déformation plastique d'un polymère semi cristallin a/ trois lamelles cristallines d'un sphérolithe sont reliées entre elles par des chaînes amorphes avant déformation. b/ glissement des chaînes dans les lamelles cristallines. c/ fragmentation des lamelles cristallines en blocs cristallins. d/ alignement des blocs cristallins et des chaînes amorphes (d'après Jean Paul Mercier et al.)

La déformation plastique par cisaillement intervient pour les polymères vitreux thermoplastiques et aussi une *déformation plastique par microfissuration* (crazing) surtout dans les polymères vitreux.

II/ DEFORMATION VISCOPLASTIQUE

II 1/ Matériaux métalliques

Si on applique une charge, la déformation n'est pas instantanée et lorsqu'on cesse la charge, la déformation perdure un certain temps encore (cf cours précédent)

II 1 1/ Relaxation

En ce qui concerne la relaxation, on part donc d'une mise sous charge à déformation contrôlée suivi d'un maintien à déformation constante

Il existe une relation entre les vitesses d'évolution de σ et de déformation viscoplastique $\dot{\epsilon}$ selon une relation qui fait intervenir le module d'Young, E : $\dot{\sigma} = -E\dot{\epsilon}^v$ (avec v = vitesse)

II 1 2/ Fluage

Dans l'expérience de fluage qui est mentionnée aussi, on impose un échelon de contrainte et on mesure l'évolution de la déformation (cf cours précédent)

En fluage, il peut y avoir une évolution de la caractéristique mécanique, par modification de l'

* état d'écrouissage par rapport au temps (c'est le time hardening)

* état d'écrouissage par rapport à la déformation (c'est le strain hardening)

II 2/ Rôle des évolutions structurales

La notion de réversibilité est souvent non vérifiée, en particulier en raison d'évolutions microstructurales. Il en va de même pour d'autre type de déformation, par ex en torsion simple

* On parle par exemple de *restauration*, qui correspond en fait à de la viscoplasticité à haute température en relation avec d'autres phénomènes

* On a aussi signalé les effets du *vieillessement*, se traduisant par exemple par un durcissement ou adoucissement en relation avec des évolutions microstructurales

II 3/ Effet de la vitesse de déformation

III 3 1/ Exemples du rôle de la vitesse de sollicitation mécanique

III 3 2/ Notion de contrainte visqueuse

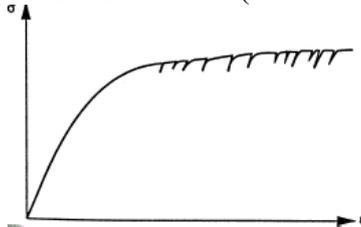
La contrainte est dissociable en deux composantes : $\sigma = \sigma_c(\epsilon_v, \alpha) + \sigma_v(\epsilon_v, \alpha)$

σ_c = contrainte critique pour la plasticité instantanée à vitesse nulle

σ_v = contrainte visqueuse dépendant de la vitesse de déformation viscoplastique ($\sigma_v = 0$ à vitesse nulle) α = variable d'écroutissage

III 3 3/ Effets possibles de la vitesse sur les évolutions mécaniques en traction

Il faut signaler un effet possible de la vitesse de déformation au niveau de la résistance à la déformation de matériaux en traction se traduisant par une / de la résistance à la déformation à vitesse faible. Ceci s'explique par une relaxation possible des contraintes suite à un mouvement et à un réarrangement des dislocations (Effet Portevin-Le Châtelier).



Effet Portevin-Le Châtelier à vitesse de déformation imposée

III / SUPERPLASTICITE

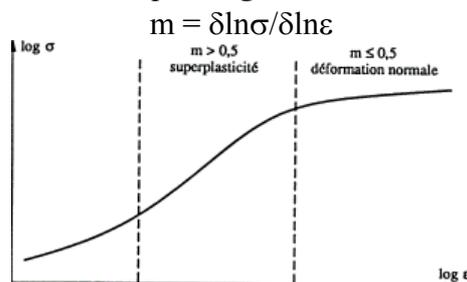
IV 1/ Définition

Il existe des conditions spécifiques pour lesquelles la déformation devient très importante.

On peut faire les remarques suivantes (Figure 24) :

* Pour le domaine des hautes températures : coefficient d'écroutissage faible

* La stabilité de la déformation assurée par la grande sensibilité à la vitesse de déformation



Sensibilité de la contrainte d'écoulement σ avec la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$

Le comportement superplastique est observé dans le domaine des vitesses intermédiaires (m entre 0.3 à 0.9) ; $\sigma = K(\dot{\epsilon}_v)^m$

IV 2/ Rôle de la microstructure sur la superplasticité dans les alliages métalliques

* La superplasticité est observée à $T > 0.5T$ sous de faibles vitesses de déformation

($\dot{\epsilon} < 10^{-3} s^{-1}$) et l'énergie d'activation Q est faible.

* Lorsque la taille de grains est fine, il y a une importante zone dénudée de précipités autour des joints qui joue un rôle important dans le phénomène de superplasticité (zone molle).