

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

## MATÉRIAUX

### Mise en forme des métaux

Plasticité, rhéologie, tribologie

Éric FELDER



**La côte de l'ouvrage : 2-671-29**

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	1
<b>Table des matières</b>	4
<b>Principales notations</b>	9
<b>Chapitre I : Présentation générale des procédés de mise en forme par déformation plastique</b>	11
<b>1. Aspects généraux</b>	11
1.1. Principales opérations de fabrication de pièces métalliques	11
1.2. Evolutions de la mise en forme des métaux	12
1.3. Problématiques scientifiques	17
<b>2. Description géométrique et cinématique des procédés</b>	19
2.1. Procédés sans enlèvement de matière	19
2.2. Procédés avec enlèvement de matière	21
2.3. Procédés de fonderie	22
2.4. Frittage	23
<b>3. Phénomènes physiques fondamentaux</b>	24
3.1. Transition liquide-solide et refroidissement jusqu'à 20°C	24
3.2. Déformation plastique, frottement et ductilité	27
3.3. Frittage et densification plastique	31
<b>4. Mise en œuvre des principaux procédés</b>	32
4.1. Comparaison de la mise en forme à chaud et à froid	32
4.2. Evolution des conditions de l'ébauchage vers la finition	35
4.3. Cas des aciers	36
4.4. Cas des alliages non ferreux	39
<b>5. Exercices</b>	42
5.1. Critère de plasticité en traction-compression latérale	42
5.2. Effet de coin et contrainte de tréfilage	43
5.3. Contraintes thermiques et fatigue thermique	45
<b>Chapitre II : Equations de l'écoulement plastique</b>	47
<b>1. Equations mécaniques</b>	47
1.1. Equations en volume	47
1.2. Lois de frottement	49
<b>2. Equations thermiques</b>	51
2.1. Equation de la chaleur	51
2.2. Transfert de chaleur aux interfaces	53
<b>3. Exercices</b>	53
3.1. Déformation plane	53
3.2. Contrainte plane	54
3.3. Etude des discontinuités de vitesse	55

Table des matières	5
3.4. Théorème des puissances virtuelles	57
3.5. Principe du travail maximal et théorème de la borne supérieure	58
3.6. Estimation par défaut de la déformation imposée par un écoulement stationnaire	61
<b>Chapitre III : Essais rhéologiques</b>	<b>63</b>
<b>1. Objectifs et mise en œuvre des essais rhéologiques</b>	<b>63</b>
1.1. Objectifs	63
1.2. Mise en œuvre	64
<b>2. Mise en œuvre des principaux essais</b>	<b>65</b>
2.1. Essai de traction	65
2.2. Essai de torsion	73
2.3. Essais de flexion	77
2.4. Essais de dureté	81
2.5. Essai de compression	83
<b>3. Caractérisation du comportement</b>	<b>84</b>
3.1. Représentation du comportement plastique à froid	84
3.2. Domaine de la déformation à chaud	87
3.3. Caractéristiques du comportement à chaud	88
3.4. Comportement au-dessus de 20°C	90
<b>4. Exercices</b>	<b>92</b>
4.1. Analyse de la striction en traction	92
4.2. Analyse de la torsion	93
4.3. Formulation variationnelle des écoulements viscoplastiques	94
4.4. Comportement superplastique	97
<b>Chapitre IV : Forgeage et extrusion</b>	<b>103</b>
<b>1. Domaine d'application et exemples de pièces et de gammes</b>	<b>103</b>
1.1. Forgeage à chaud	103
1.2. Extrusion	105
<b>2. Analyse mécanique</b>	<b>107</b>
2.1. Bilan énergétique du forgeage d'une barre ou d'un cylindre	107
2.2. Méthode des tranches	109
2.3. Conséquences du frottement	111
<b>3. Analyse de la formation de défauts</b>	<b>113</b>
3.1. Optimisation de forme en forgeage	113
3.2. Prévision de fissures en extrusion	116
<b>4. Exercices</b>	<b>116</b>
4.1. Analyse par la MBS du forgeage d'une barre	116
4.2. Analyse par la MBS du forgeage d'un cylindre	117
4.3. Analyse du bipoinçonnement d'une barre épaisse	119
4.4. Morphologie de l'écoulement dans le forgeage d'une barre	122
<b>Chapitre V : Laminage</b>	<b>125</b>
<b>1. Mises en œuvre</b>	<b>125</b>
1.1. Domaine d'application	125

1.2. Diverses cages de laminoirs	126
1.3. Cas du laminage des tôles en alliage d'aluminium	127
1.4. Cas du laminage de produits longs	128
<b>2. Analyse mécanique</b>	129
2.1. Condition d'engagement	129
2.2. Analogie forgeage-laminage de tôles- cas des tôles fines	131
2.3. Estimation du couple de laminage	131
2.4. Analyse des contraintes par la méthode des tranches : colline de frottement	135
2.5. Frottement et glissement en avant, conduite des trains tandem	140
<b>3. Autres aspects du laminage</b>	141
3.1. Interactions avec les cylindres et problèmes tridimensionnels	141
3.2. Le laminage comme traitement thermomécanique	142
3.3. Aspects tribologiques	142
<b>4. Exercices</b>	144
4.1. Prise en compte de l'aplatissement élastique des cylindres	144
4.2. Approche analytique du laminage des tôles fines	146
4.3. Analyse cinématique du laminage des tôles épaisses	149
<b>Chapitre VI : Filage à chaud</b>	155
<b>1. Présentation générale</b>	156
1.1. Historique	156
1.2. Impact économique	157
1.3. Procédés de filage	157
a) Filages avant, arrière, mixte	158
b) Filages avant direct, inverse	159
c) Filages avant chemisé, sec, lubrifié, hyperlubrifié, hydrostatique	160
1.4. Cas des alliages d'aluminium peu alliés	162
a) Filage à froid	162
b) Filage à chaud	163
1.5. Traits spécifiques du filage	163
<b>2. Aspects technologiques</b>	165
2.1. Conditions de filage des aciers et des alliages d'aluminium et de cuivre	165
2.2. Installation de filage	166
a) Atelier de filage : exemple des profilés en aluminium	166
b) Presses à filer	167
c) Outillages de filage	169
2.3. Géométries de filières	170
a) Filières pour filage de barres	170
b) Filières pour filage de profilés ouverts mono- et multi-écoulements	171
c) Filières pour filage de profilés tubulaires	172
<b>3. Modèles mécaniques de filage avant</b>	173
3.1. Considérations fondamentales	174
a) Bilan énergétique	174
b) Estimation par défaut de la pression de filage (corps RPP)	175
3.2. Analyses par borne supérieure (corps RPP)	176
a) Modèle d'Avitzur	176

---

b) Modèle de Kudo	178
c) Comparaison : déformation et pression pure de filage	179
3.3. Effets viscoplastiques (à chaud)	181
a) Conséquences du comportement à chaud sur la force de filage	181
b) Contribution du conteneur et des portées	182
c) Contribution du convergent	183
<b>4. Défauts d'origine mécanique</b>	<b>186</b>
4.1. Défauts d'écoulement	186
a) Aspiration, décollement des produits massifs en fin de filage	188
b) Différences de longueur	190
c) Défauts de forme des profilés	193
4.2. Défauts de fissuration	194
a) Fissurations à cœur	195
b) Fissurations en surface (tronc de palmier...)	197
<b>5. Exercices</b>	<b>199</b>
5.1. Cinématique du filage à chaud	199
5.2. Calcul des portées d'un profilé : la clé	200
5.3. Calcul des différences de longueur	201
<b>Chapitre VII : Tréfilage et étirage</b>	<b>206</b>
<b>1. Mises en œuvre</b>	<b>207</b>
1.1. Domaine d'application	207
1.2. Opération de tréfilage	207
1.3. Tréfileuses multipasse	208
<b>2. Analyse mécanique</b>	<b>210</b>
2.1. Bilan énergétique	210
2.2. Méthode des tranches	212
2.3. Prise en compte du travail redondant par la MBS	212
2.4. Etirage de profilés	213
<b>3. Autres aspects du tréfilage</b>	<b>214</b>
3.1. Lubrification et usure des filières	214
3.2. Défauts et rupture du fil	215
3.3. Contraintes résiduelles, diamètre effectif du fil et rôle des portées	215
<b>4. Exercices</b>	<b>216</b>
4.1. Analyse par la MBS du tréfilage	216
4.2. Analyse par la MBS de l'étirage d'une barre	218
4.3. Epaisseur du film lubrifiant la filière (théorie isotherme)	221
4.4. Prise en compte de l'échauffement du lubrifiant	226
<b>Chapitre VIII : Emboutissage des tôles</b>	<b>235</b>
<b>1. Mises en œuvre</b>	<b>235</b>
1.1. Domaine d'application	235
1.2. Principe opératoire	236
1.3. Exemples de pièces embouties	237
1.4. Exemples de gammes d'emboutissage	238
<b>2. Analyse des déformations de la tôle</b>	<b>239</b>

2.1. Mise en évidence des deux modes principaux de déformation	239
2.2. Courbe limite de formage	242
2.3. Rôle de la force de serrage et des joncs de retenue	244
<b>3. Analyse de l'emboutissage profond</b>	245
3.1. Bilan énergétique	245
3.2. Influence de l'anisotropie	247
3.3. Prise en compte des flexions et du frottement	248
<b>4. Etirage sur mandrin ou repassage</b>	251
<b>5. Exercices</b>	251
5.1. Critère d'anisotropie de Hill-Application à l'anisotropie normale	251
5.2. Analyse des conditions de contact sous le serre-flan en emboutissage profond	254
5.3. Analyse du repassage	258
<b>Chapitre IX : Essais tribologiques</b>	262
<b>1. Enjeu du frottement, lubrification et essais tribologiques</b>	262
1.1. Importance du frottement en mise en forme	262
1.2. Formulation des lubrifiants et conditions de similitude de l'essai	264
1.3. Objectifs et mise en œuvre des essais tribologiques	266
<b>2. Essais avec faible déformation plastique</b>	267
2.1. Essais pion-disque et cylindres croisés	267
2.2. Essai d'étirage plan	269
2.3. Essai Inland	271
<b>3. Essais de compression</b>	274
3.1. Panorama d'essais de filage/écrasement	274
3.2. Essai de l'anneau	277
3.3. Essai de bipoinçonnement	277
3.4. Ecrasement de cylindres	279
<b>4. Exercices</b>	281
4.1. Analyse de l'écoulement de Poiseuille et frottement associé	281
4.2. Prise en compte du frottement de Norton-Hoff dans les écoulements viscoplastiques	284
4.3. Analyse de l'essai de cisaillement sous haute pression de Bridgman	285
4.4. Le modèle de frottement de la vague plastique	293
<b>Bibliographie</b>	298

# Principales notations

## Conventions

Les vecteurs et tenseurs sont représentés par des caractères gras : **A**, **a**, **s**,... On adopte la convention d'Einstein de sommation par rapport aux indices répétés (sauf si les indices sont soulignés).

<b>A</b> <sup>t</sup>	tenseur transposé du tenseur <b>A</b> : $A_{ij}^t = A_{ji}$
<b>a</b> <sup>t</sup>	matrice ligne, transposée du vecteur <b>a</b> , représenté par une matrice colonne ( $a_i$ )
<b>a</b>	module du vecteur <b>a</b> : $(\mathbf{a}^t \mathbf{a})^{1/2}$
<b>a</b> <sup>t</sup> <b>b</b> = $a_i b_i$	produit scalaire des deux vecteurs <b>a</b> et <b>b</b>
<b>A</b> : <b>B</b> = $A_{ij} B_{ij}$	produit tensoriel des deux tenseurs <b>A</b> et <b>B</b> .
<b>grad</b> , $\Delta$ , <b>div</b>	opérateurs différentiels gradient, Laplacien, divergence

## Symboles

<b>A</b>	$m^2$	aire de la section de l'éprouvette
<b>C<sub>d</sub></b>		surface de discontinuité de vitesse dans le métal
<b>C<sub>0</sub></b>		interface métal-outil
<b>D</b>	Pa	critère d'endommagement de Latham et Cockcroft
<b>E</b>	Pa	module d'Young
<b>F</b>	N	force de traction
<b>HV</b>	-, Pa	dureté Vickers
<b>k</b>	Pa	cission maximale du métal
<b>L</b>	m	longueur d'éprouvette
<b>m</b>	-	indice de viscosité du métal
$\bar{m}$	-	coefficient de frottement de Tresca
<b>n</b>	-	coefficient d'écrouissage du métal
<b>n</b> ( $n_i$ )	-	normale unitaire extérieure au volume de métal
$Ox_1, x_2, x_3$	-	système de coordonnées cartésiennes
$Or\theta z$	-	système de coordonnées polaires
<b>p</b>	Pa	pression de contact
<b>p<sub>H</sub></b>	Pa	pression hydrostatique
<b>R</b>	m	rayon d'éprouvette
<b>R<sub>e</sub></b>	Pa	limite d'élasticité
<b>R<sub>m</sub></b>	Pa	résistance
<b>s</b> ( $s_{ij}$ )	Pa	déviateur des contraintes
<b>t</b>	s	temps
<b>T</b>	°C, K	température
<b>T<sub>F</sub></b>	K	température absolue de fusion
<b>T</b> ( $T_i$ )	Pa	vecteur contrainte
<b>u</b> ( $u_i$ )	$m \cdot s^{-1}$	vitesse
<b>W</b>	J	travail dépensé
$\dot{W}$	W	puissance
$\bar{\alpha}$	$s^{-m}$	coefficient de la loi de frottement de Norton-Hoff

$\beta$	$\text{Pa.m}^p.\text{s}^p-$	coefficient de la loi de frottement de Norton-Hoff
$\Delta \mathbf{u}$ ( $\Delta u_i$ )	$\text{m.s}^{-1}$	discontinuité de vitesse
$\varepsilon$	-	déformation uniaxiale
$\boldsymbol{\varepsilon}$ ( $\varepsilon_{ij}$ )	-	tenseur des déformation
$\bar{\varepsilon}$	-	déformation généralisée de von Mises
$\dot{\varepsilon}$	$\text{s}^{-1}$	vitesse de déformation uniaxiale
$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ ( $\dot{\varepsilon}_{ij}$ )	$\text{s}^{-1}$	tenseur de vitesse de déformation
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	$\text{s}^{-1}$	vitesse de déformation généralisée de von Mises
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	-	déformations principales en emboutissage $\varepsilon_3$ caractérise la variation d'épaisseur
$\lambda$	-	allongement du produit mis en forme
$\mu$	-	coefficient de frottement de Tresca
$\nu$	-	coefficient de Poisson
$\boldsymbol{\sigma}$ ( $\sigma_{ij}$ )	Pa	tenseur des contraintes
$\sigma_0$	Pa	contrainte d'écoulement plastique
$\bar{\sigma}$	Pa	contrainte généralisée de von Mises
$\sigma_1$	$\text{Pa.s}^m$	consistance du métal
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Pa	contraintes principales
$\tau$	Pa	cission
$\Omega$		volume de la zone de déformation plastique

### Indices

d	par unité d'aire d'une surface de discontinuité de vitesse dans le métal $C_d$
f	par unité d'aire de l'interface métal/outil $C_0$
F	relatif à la fusion
R	rupture
u	par unité de volume

### Exposants

e	élastique
p	plastique

### Abréviations :

MBS	Méthode de la Borne Supérieure (corps RPP)
RPP	Rigide-Parfaitement Plastique ( $E \infty, \sigma_0$ constant)