

Table des matières

Chapitre I

Les outils de la mécanique des milieux continus 21

I.1 Vitesse de déformation et déformation	21
I.1.1 Définitions	21
I.1.2 Trois chemins de déformation simples	24
I.1.3 Chemins de déformation complexes	29
I.2 Contraintes	31
I.2.1 Définitions	31
I.2.2 Equations d'équilibre	33
I.3 Comportements plastique et viscoplastique	34
I.3.1 Critères de plasticité	34
I.3.2 Lois d'écoulement	40
I.3.3 Comportement viscoplastique	44
I.3.4 Trois chemins de déformation simple (suite)	45
I.4 Théorèmes d'extremum en viscoplasticité	48
I.5 Annexes	50
I.5.1 Expressions du tenseur gradient de vitesse et des équations d'équilibre des contraintes en coordonnées cylindriques et sphériques	50
I.5.2 Lignes de courant et trajectoires	53
I.5.3 Déformation équivalente. Influence du chemin de déformation	56
I.5.4 Energie élastique et critère de von Mises	60
I.5.5 Section d'une frontière d'écoulement par le plan π	63
I.5.6 Prédiction des cornes d'emboutissage	65
I.5.7 Note sur le « Dynamic Material Modeling »	68

Chapitre II

Les outils de la plasticité cristalline 71

II.1 Cristallographie élémentaire des métaux	72
II.1.1 Le réseau cristallin	72
II.1.2 Les indices de Miller	78
II.1.3 Le motif	81
II.1.4 Empilements compacts	84

II.2 Mécanique du monocristal	86
II.2.1 Glissement cristallographique	86
II.2.2 Frontière d'écoulement du monocristal	90
II.2.3 Loi d'écoulement	97
II.2.4 Modèle cristallin viscoplastique	100
II.2.5 Rotation des axes cristallographiques	103
II.2.6 Facteur d'orientation et facteur de Taylor	104
II.3 Annexe	105
II.3.1 Notations de Miller à 4 indices pour le réseau hexagonal	105

Chapitre III

Les outils de la métallurgie physique 111

III.1 Energie des dislocations	112
III.2 Interactions entre dislocations	115
III.2.1 Formule de Peach et Koehler	115
III.2.2 Interaction entre deux dislocations coins parallèles	117
III.2.3 Interaction entre deux dislocations partielles de Shockley parallèles	120
III.3 Mouvement des dislocations	123
III.3.1 Relation d'Orowan	123
III.3.2 Montée des dislocations	124
III.3.3 Glissement thermiquement activé	127
III.4 Grains, joints et sous-joints	130
III.4.1 Représentation des grains	130
III.4.2 Désorientation des grains	132
III.4.3 Mouvement des joints de grains	136
III.5 Annexes	138
III.5.1 Variations du facteur κ de la relation (III.39)	138
III.5.2 Evolution du rapport de forme des grains	140
III.5.3 Matrice de passage, rotation et angles d'Euler	144
III.5.4 Distribution « de Mackenzie » pour des cristaux de structure hexagonale	147

Chapitre IV

Essais rhéologiques à chaud 149

IV.1 Essais de compression	151
IV.1.1 Essai de compression uniaxiale	152
IV.1.2 Essai de compression plane encastrée	155

IV.2 Essai de torsion	157
IV.2.1 Etude cinématique	158
IV.2.2 Calcul de la contrainte d'écoulement	160
IV.2.3 Distribution de la puissance plastique	162
IV.3 Annexes	163
IV.3.1 Modèle de frottement de Tresca	163
IV.3.2 Application de la relation de Fields et Backofen	164

Chapitre V

Notions sur les textures 169

V.1 Textures morphologiques et topologiques	169
V.2 Fonction de distribution des orientations cristallines	171
V.3 Représentations bidimensionnelles de la texture cristallographique	174
V.3.1 Projection stéréographique	174
V.3.2 Figures de pôles	180
V.4 Symétries des textures : exemples	184
V.4.1 Textures de laminage	184
V.4.2 Textures de torsion	186
V.5 Annexe	189
V.5.1 Classification des textures de torsion des matériaux cubiques	189

Chapitre VI

Mécanismes de la déformation à chaud 195

VI.1 Mécanismes d'adoucissement statique	195
VI.1.1 Etat déformé à froid : microstructure écrouie	196
VI.1.2 Restauration statique	197
VI.1.3 Recristallisation statique	200
VI.1.4 Croissance des grains	205
VI.2 Recristallisation dynamique	206
VI.2.1 Recristallisation dynamique continue	206
VI.2.2 Recristallisation dynamique discontinue	213
VI.2.3 Remarques générales	220
VI.3 Transformations métadynamiques	222
VI.4 Annexe	225
VI.4.1 Cinétique de recristallisation statique : Loi d'Avrami	225

Chapitre VII

Lois de comportement à chaud 231

VII.1 Paramètres rhéologiques macroscopiques	231
VII.1.1 Sensibilité à la vitesse	232
VII.1.2 Sensibilité à la température	232
VII.1.3 Sensibilité à la déformation	234
VII.1.4 Coefficient de Taylor-Quinney	234
VII.2 Lois de comportement empiriques (macroscopiques)	235
VII.3 Modèles physiques (microscopiques)	239
VII.3.1 Modèle de Kocks-Mecking	240
VII.3.2 Modèle de Laasraoui-Jonas	241
VII.3.3 Loi puissance	243
VII.3.4 Paramètres rhéologiques microscopiques	244
VII.4 Relations entre contrainte d'écoulement et microstructure	245
VII.5 Annexes	248
VII.5.1 Calcul du coefficient de Taylor-Quinney	248
VII.5.2 Interprétations de la limite d'élasticité	249
VII.5.3 Modèle de Stüwe-Hertel	251
VII.5.4 Modèle élémentaire de recristallisation dynamique discontinue	252

Chapitre VIII

Déformation à chaud des alliages biphasés 257

VIII.1 Du métal pur à l'alliage multiphasé	258
VIII.2 Caractérisation des alliages biphasés	259
VIII.2.1 Forme des domaines homogènes	260
VIII.2.2 Distribution des domaines homogènes	261
VIII.2.3 Lois de comportement des phases et du mélange	263
VIII.3 Lois de mélange « simples »	264
VIII.3.1 Modèle de Taylor	265
VIII.3.2 Modèle statique	266
VIII.3.3 Modèle Iso- w	267
VIII.4 Mécanique de l'inclusion d'Eshelby	269
VIII.4.1 Inclusion élastique sphérique	269
VIII.4.2 Inclusion élastique ellipsoïdale	273
VIII.4.3 Inclusion (sphéroïdale) et matrice viscoplastiques linéaires	275
VIII.4.4 Inclusion (sphéroïdale) et matrice viscoplastiques non linéaires	278
VIII.5 Lois de mélange utilisant la mécanique de l'inclusion d'Eshelby	279
VIII.5.1 Cas où l'une des phases est minoritaire	279

VIII.5.2 Cas d'un mélange de phases approximativement équivolumique	282
VIII.6 Paramètres rhéologiques des alliages biphasés	284
VIII.7 Annexes	286
VIII.7.1 Fractions volumiques et massiques	286
VIII.7.2 Champ de déplacement élastique autour d'une inclusion sphérique	289
VIII.7.3 Energie élastique des configurations d'Eshelby	290

Chapitre IX

Instabilités, endommagement et ductilité 297

IX.1 Définitions et mesures de la ductilité	297
IX.2 Instabilités en mise en forme	300
IX.2.1 Critère portant sur l'effort de traction	300
IX.2.2 Critère portant sur la réduction de section	307
IX.2.3 Notions sur le comportement superplastique	308
IX.3 Endommagement en mise en forme	311
IX.3.1 Amorçage d'une cavité	311
IX.3.2 Croissance d'une cavité isolée	313
IX.3.3 Comportement des matériaux poreux	315
IX.4 Critères macroscopiques de rupture ductile	320
IX.5 Annexes	321
IX.5.1 Extension du critère de Considère à un essai anisotherme	321
IX.5.2 Critère de Shima et Oyane sous chargement axisymétrique	322

Chapitre X

Exercices corrigés 325

X.1 Compacité des structures <i>cc</i> , <i>cfc</i> et <i>hc</i>	325
X.2 Mailles élémentaires rhomboédriques des structures <i>cc</i> et <i>cfc</i>	326
X.3 Structure cristalline du rutile TiO_2	329
X.4 Réduction du critère de Hill au cas isotrope	331
X.5 Critère de Hill : compression uniaxiale	334
X.6 Critère de Hill : compression 3D	338
X.7 Critère de Hill : essais mécaniques sur une tôle mince	341
X.8 Critère de plasticité polynomial d'exposant supérieur à 2	345
X.9 Critère de plasticité monoclinique prismatique	348
X.10 Essai de traction uniaxiale	351
X.11 Champ de vitesse non uniforme en compression	355
X.12 Gonflement d'une bulle dans une matrice viscoplastique linéaire	358
X.13 Extrusion d'une barre	362

X.14 Procédé d'étirage à chaud	365
X.15 Effets d'inertie en traction	370
X.16 Méthode d'Eshelby : analogie des ressorts	374
X.17 Température homologue et paramètre de Zener-Hollomon	378
X.18 Loi de comportement pseudoplastique générale	379
Références	383
Glossaire français-anglais	391
Index	395