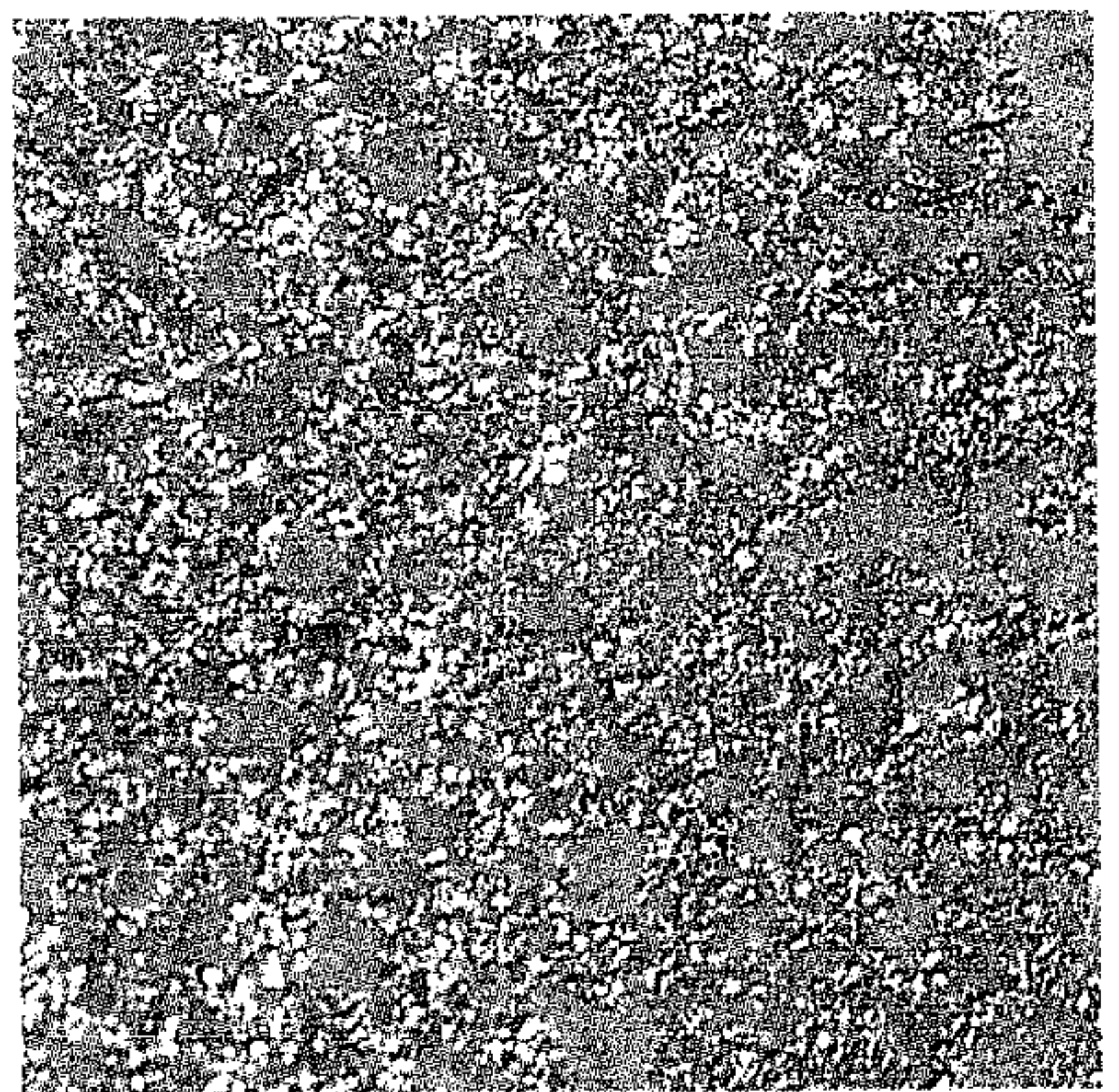


Mécanique et Ingénierie des Matériaux

Métallurgie des poudres



sous la direction de
Didier Bouvard

hermes

Lavoisier

2-671-14-1

2-671-14-1

Métallurgie des poudres

sous la direction de
Didier Bouvard

hermes
Science
— publications —

Table des matières

Introduction	17
Yves BIENVENU et Didier BOUVARD	
Chapitre 1. L'élaboration des poudres.	21
Régis BACCINO et Henri PASTOR	
1.1. Introduction	21
1.2. Techniques mécaniques	23
1.2.1. Introduction	23
1.2.2. Broyage	23
1.2.3. Autres techniques basées sur le choc	25
1.2.3.1. Procédé Coldstream	25
1.2.3.2. Broyeurs à marteau et à barreaux	26
1.2.4. Mécanosynthèse	26
1.3. Techniques d'atomisation	29
1.3.1. Introduction	29
1.3.2. Caractéristiques générales des poudres atomisées	30
1.3.3. Atomisation par un fluide	32
1.3.3.1. Atomisation à l'eau	32
1.3.3.2. Atomisation à l'huile	32
1.3.3.3. Atomisation par gaz	33
1.3.4. Atomisation par centrifugation.	35
1.3.4.1. Atomisation par disque tournant	35
1.3.4.2. Atomisation par bol tournant.	35
1.3.4.3. Procédé de solidification rapide	36
1.3.4.4. Procédés à électrode tournante.	36
1.3.5. Autres techniques d'atomisation.	38
1.3.5.1. Atomisation par ultrasons	38

1.3.5.2. Atomisation par rouleaux	38
1.3.5.3. Atomisation par orifice vibrant	38
1.4. Techniques chimiques	38
1.4.1. Réactions mettant en jeu un réactant solide	38
1.4.1.1. Evaporation-condensation	39
1.4.1.2. Réactions chimiques.	39
1.4.2. Réactions mettant en jeu un réactant liquide (fondu) ou en solution .	47
1.4.2.1. Réduction en phase fondue.	47
1.4.2.2. Réduction de solution aqueuse (ou organique) par un réducteur gazeux (H ₂) ou liquide.	48
1.4.2.3. L'électrolyse	49
1.4.2.4. L'élimination de solvant	50
1.4.2.5. La précipitation.	51
1.4.2.6. Le procédé sol-gel	53
1.4.3. Réactions mettant en jeu un réactant gazeux.	54
1.4.3.1. La décomposition thermique du réactant	54
1.4.3.2. La réaction en phase vapeur	55
1.5. Bibliographie	57
Chapitre 2. La compression à froid	61
Pierre DORÉMUS et Gérard PUENTE	
2.1. Objectif de la compression	61
2.2. Mécanisme de la compression en matrice	63
2.2.1. Densification	63
2.2.1.1. Les poudres à l'état non comprimé	64
2.2.1.2. La densification	66
2.2.2. Frottement poudre/outillage	68
2.2.3. Lubrification.	71
2.2.3.1. Rôle du lubrifiant	71
2.2.3.2. Les lubrifiants courants et leurs caractéristiques	72
2.2.3.3. Lubrifiant-densité apparente	73
2.2.3.4. Lubrifiant-densité à cru-effort d'éjection	75
2.2.3.5. Lubrification externe de l'outillage	77
2.2.4. Influence de la vitesse de compression	77
2.2.5. Propriétés des comprimés à cru	78
2.3. Principe et technologie de la compression en matrice	78
2.3.1. Compression d'un cylindre	79
2.3.2. Compression d'une pièce complexe pour l'automobile	87
2.3.3. Technologie des presses industrielles.	93
2.3.4. Les outillages	94
2.3.5. Les cinématiques de compression	95
2.3.6. Les opérations postcombustion : calibrage, filage, mandrinage	96
2.3.6.1. Possibilités géométriques.	97

2.3.6.2. Comparaisons techniques et économiques.	97
2.4. Autres types de mise en forme par compression.	97
2.4.1. Compression hydrostatique.	97
2.4.2. Compression-laminage	98
2.4.3. Compression rotative	100
2.4.4. Compression dynamique	101
2.4.4.1. Compression par choc hydraulique	101
2.4.4.2. Compression explosive	101
2.4.4.3. La compression par impact de projectile.	102
2.5. Les moyens de caractérisation	103
2.5.1. Caractérisation de la poudre et du comprimé	103
2.5.2. Caractérisation du frottement.	105
2.6. Caractérisation mécanique des poudres.	106
2.6.1. Comportement élastique.	107
2.6.2. Comportement plastique	109
2.6.2.1. Densité et état de contrainte	110
2.6.2.2. Déformations et contraintes	112
2.7. Modélisation du comportement des poudres et simulation numérique du procédé	113
2.7.1. Lois élastoplastiques	114
2.7.1.1. Elasticité.	114
2.7.1.2. Plasticité.	114
2.7.2. Comparaison entre les prédictions de la simulation numérique et l'expérience	120
2.8. Bibliographie	121

Chapitre 3. Le moulage par injection 123

Hélène BURLET

3.1. Généralités sur le moulage par injection de poudre métallique.	123
3.1.1. Principe du procédé	123
3.1.2. Les différentes étapes	124
3.2. Description des différents constituants	126
3.2.1. La poudre métallique	126
3.2.2. Le liant	130
3.2.3. Le mélange poudre-liant.	132
3.3. La mise en forme par injection	135
3.3.1. Le procédé.	135
3.3.2. Propriétés rhéologiques des pâtes chargées	141
3.3.3. Propriétés thermomécaniques des pâtes chargées à l'état solide . . .	152
3.3.4. Modélisation du procédé	155
3.4. L'extraction du liant	157
3.4.1. Mécanismes de transport de fluide dans un milieu poreux	158
3.4.2. Extraction du liant par dégradation thermique.	162

3.4.3. Extraction du liant par immersion dans un solvant	168
3.4.4. Autres techniques.	169
3.5. Le frittage et les propriétés des matériaux élaborés par MIM.	170
3.5.1. Spécificité du frittage en MIM.	170
3.5.2. Propriétés des matériaux élaborés par MIM.	172
3.6. Bibliographie	172
Chapitre 4. Le frittage naturel	177
Jean-Michel MISSIAEN	
4.1. Introduction	177
4.2. Forces motrices du frittage	178
4.2.1. Force motrice globale	178
4.2.2. Forces motrices locales	180
4.3. Le frittage : approche macroscopique	183
4.3.1. Introduction – définitions	183
4.3.2. Changement de taille et changement de forme des pièces : effet de la mise en forme	185
4.3.3. Modélisation des variations dimensionnelles	186
4.4. Frittage d'un solide monphasé de composition homogène : approche microscopique.	189
4.4.1. Schéma général : mécanismes de consolidation, de densification et de croissance des grains	189
4.4.2. Cinétique de consolidation et de densification : approche simplifiée	192
4.4.3. Croissance de grains : cas simple du poly cristal monphasé dense.	197
4.4.4. Couplage densification – croissance de grains	200
4.5. Frittage d'un solide monphasé de composition homogène : effet des hétérogénéités microstructurales	203
4.5.1. Introduction	203
4.5.2. Effets des hétérogénéités sur le frittage : approche macroscopique	204
4.5.3. Evolution de l'environnement des grains – réarrangement	206
4.5.4. Effet d'une distribution de taille des pores – cas des poudres agglomérées.	208
4.5.5. Effet d'une distribution de taille des grains – rôle de la croissance de grains pour la réduction des hétérogénéités	210
4.5.6. Croissance de grains dans les agrégats polycristallins : croissance « normale » et « anormale »	212
4.6. Frittage des mélanges	213
4.6.1. Introduction	213
4.6.2. Frittage de mélanges polyphasés non réactifs : cas d'inclusions inertes et rigides dans une matrice	214
4.6.3. Frittage réactif : généralités.	221
4.6.4. Frittage réactif : cas d'un solide monphasé en présence de dopants	224

4.6.5. Frittage réactif : cas du frittage avec phase liquide	226
4.7. Mise en œuvre pratique du frittage : cycle thermique et atmosphères de frittage	231
4.8. Bibliographie	234
Chapitre 5. La mise en forme à chaud	239
Didier BOUVARD et Michel GROBRAS	
5.1. Introduction	239
5.2. Description des principaux procédés	240
5.2.1. Compactage isostatique à chaud (ou CIC)	240
5.2.2. Compactage en matrice fermée	244
5.2.3. Forgeage	245
5.2.4. Extrusion	245
5.2.5. Autres procédés	248
5.3. Mécanismes de déformation et modélisation microscopique	248
5.3.1. Généralités	248
5.3.2. Géométrie des modèles	249
5.3.3. Mécanismes contribuant à la densification	250
5.3.3.1. Déformation plastique	250
5.3.3.2. Fluage	251
5.3.3.3. Autres mécanismes	253
5.3.4. Cartes de densification	253
5.3.5. Evolution des modèles	255
5.4. Modélisation macroscopique	257
5.4.1. Généralités	257
5.4.2. Etats de contrainte	258
5.4.3. Les lois de comportement	259
5.4.4. Transferts thermiques	261
5.4.5. Simulation numérique	262
5.5. Relation procédés-propriétés	264
5.5.1. Généralités	264
5.5.2. Procédés à forte dynamique	264
5.5.3. Procédés statiques ou quasi-statiques	265
5.5.4. Exemples d'applications	267
5.6. Bibliographie	271
Chapitre 6. Les pièces de structures pour l'automobile	275
Pierre BLANCHARD	
6.1. Introduction	275
6.2. Les pièces classiques	280
6.2.1. Les poulies pour courroie crantée	280
6.2.2. Pignons de pompe à huile	283

6.2.3. Bague ABS	283
6.2.4. Moyeu de synchronisation	286
6.2.5. Bague de synchronisation	289
6.3. Les nouveaux marchés	290
6.3.1. Lobes de came pour arbre à cames assemblé	290
6.3.2. Bielle	291
6.3.3. Pignon à haute densité	292
6.3.4. Baladeur	293
6.3.5. Bride d'injecteur	294
6.4. Tendances pour le futur	295
6.5. Bibliographie	296

Chapitre 7. Les matériaux durs 299

Henri PASTOR

7.1. Introduction	299
7.2. Les cermets à base de WC.	300
7.2.1. Considérations générales et applications	300
7.2.1.1. Introduction	300
7.2.1.2. Commentaires sur les relations opérations de fabrication – structure – propriétés	301
7.2.1.3. Applications	303
7.2.1.4. Aperçu sur les opérations de fabrication	304
7.2.2. Préparations des poudres de matières premières	305
7.2.2.1. Préparation du tungstène et du carbure de tungstène	305
7.2.2.2. Préparation du cobalt	313
7.2.3. Préparation des mélanges prêts à l'emploi	314
7.2.4. Mise en forme (consolidation)	316
7.2.5. Le frittage	318
7.2.6. Finition et revêtement	322
7.2.7. Contrôle de la qualité	323
7.3. Autres cermets	323
7.3.1. Cermets à base de TiC ou de Ti(C,N).	323
7.3.2. Cermets à base de Cr ₃ C ₂	328
7.3.3. Cermets à base de TiB ₂ ou de borures ternaires	330
7.3.4. Conclusion	331
7.4. Bibliographie	332

Chapitre 8. Les matériaux composites 337

Jean-Marc HEINTZ et Jean-Michel QUENISSET

8.1. Intérêt des plasturgie, métallurgie et céramique des poudres pour les matériaux composites	337
8.1.1. Une solution attractive au niveau de la mise en œuvre	337

8.1.1.1. La « voie poudre » évite des inconvénients d'autres voies d'élaboration	337
8.1.1.2. Principaux avantages d'une subdivision de la matrice à l'état solide	338
8.1.2. Une voie d'élaboration autorisant diverses textures	340
8.1.2.1. Des microstructures réalisées à partir de constituants discontinus	340
8.1.2.2. Des architectures réalisées à partir de préformes fibreuses	342
8.1.2.3. Des multimatériaux stratifiés ou tubulaires	343
8.2. Mise en œuvre des matériaux composites à partir de poudres.	344
8.2.1. Spécificités au niveau de la préparation des poudres.	344
8.2.1.1. Adaptation morphologique des constituants.	344
8.2.1.2. Ajustement des interfaces entre constituants	346
8.2.2. Réalisation du couplage des constituants.	347
8.2.2.1. Composites de forme simple.	347
8.2.2.2. Composites de forme lamellaire.	350
8.2.2.3. Composites de forme complexe.	352
8.2.3. Mécanosynthèse, procédés réactionnels et phénomènes associés à la densification	353
8.2.3.1. Mécanosynthèse	353
8.2.3.2. Procédés réactionnels	354
8.2.3.3. Dégradations dues à la densification	356
8.2.4. Conclusion.	356
8.3. Propriétés et applications	357
8.3.1. Des performances mécaniques améliorés	357
8.3.1.1. Rigidité et coefficient de dilatation	357
8.3.1.2. Résistances, ductilité	358
8.3.1.3. Dureté et résistance à l'usure.	360
8.3.1.4. Ténacité et résistance au choc	360
8.3.1.5. Résistance à la fatigue.	362
8.3.1.6. Résistance au fluage.	363
8.3.1.7. Conclusion	363
8.3.2. Propriétés électriques, thermiques et leurs applications	364
8.3.3. Matériaux nucléaires	365
8.3.4. Combinaison de propriétés	365
8.3.4.1. Matériaux à gradients de fonction.	365
8.3.4.2. Combinaison de propriétés.	366
8.3.4.3. Matériaux intelligents	367
8.3.5. Composites pour les biomatériaux.	367
8.4. Conclusion générale	368
8.5. Bibliographie	369
Index	377

ALLIAGES MÉTALLIQUES

Le traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux répond au besoin de disposer d'un ensemble complet des connaissances et méthodes nécessaires à la maîtrise de ce domaine.

Conçu volontairement dans un esprit d'échange disciplinaire, le traité MIM est l'état de l'art dans les domaines suivants retenus par le comité scientifique :

- Alliages métalliques
- Géomatériaux
- Matériaux de construction
- Méthodes numériques
- Mise en forme des matériaux
- Polymères

Chaque ouvrage présente aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux. Une classification des différents articles contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.