

Table des matières

Avant-propos	11
Chapitre 1. Procédés de mise en forme	13
1.1. Introduction	13
1.2. Différents procédés	13
1.2.1. La fonderie	14
1.2.2. L'usinage	15
1.2.3. La métallurgie des poudres	16
1.3. Mise en forme à chaud et à froid	18
1.3.1. Influence des paramètres statiques	21
1.3.1.1. Niveau de contrainte	21
1.3.1.2. Triaxialité des contraintes	21
1.4. Hydroformage	23
1.4.1. Les limites du procédé	25
1.5. Emboutissage profond	25
1.6. Caractérisation expérimentale	26
1.7. Les critères de mise en forme	27
1.7.1. Influence de la structure des tôles	30
1.7.2. Mécanismes physiques de déformation	31
1.7.3. Les différents critères	32
Chapitre 2. Mécanique des grandes déformations et contact	35
2.1. Introduction	35
2.2. Cinématique des grandes transformations	35
2.2.1. Cinématique du problème en coordonnées spatiales	36
2.3. Gradient de la transformation	37
2.4. Mesure des déformations	37

2.4.1. Décomposition polaire de \mathbb{F}	38
2.4.2. Tenseur vitesse des déformations	39
2.4.3. Décomposition canonique de \mathbb{L}	39
2.4.4. Cinématique du problème en coordonnées convectives	40
2.4.5. Tenseur de transformation	40
2.4.5.1. Transport convectif	41
2.4.5.2. Dérivées convectives	42
2.4.5.3. Tenseurs des déformations	42
2.4.6. Mesure des vitesses de déformation	43
2.4.6.1. Dérivation convective et symboles de Cristoffel	44
2.4.6.2. Calcul de la vitesse de déformation	45
2.4.6.3. Calcul du tenseur de déformation en fonction du déplacement	45
2.4.7. Tenseur des contraintes	45
2.5. Relations constitutives	47
2.5.1. Grandes transformations élastoplastiques	49
2.5.1.1. Objectivité et dérivées objectives	49
2.5.2. Décomposition cinématique de la transformation	51
2.6. Problème incrémental de comportement	52
2.6.1. Incrémentation des contraintes	53
2.6.2. Incrémentation des déformations	55
2.6.3. Résolution du problème de comportement	57
2.6.3.1. Cas élastique	57
2.6.3.2. Cas élastoplastique	57
2.7. Ecriture du P.P.V. en grandes transformations	59
2.7.1. Equations d'équilibre	59
2.7.2. Ecriture de P.P.V.	60
2.7.3. Formulation incrémentale	61
2.8. Cinématique du contact	62
2.8.1. Définition du problème et notations	62
2.8.2. Formulation du contact	63
2.8.3. Formulation du problème de frottement	64
2.8.4. Lois de frottement	64
2.8.5. Loi de Coulomb	64
2.8.6. Loi de Tresca	66

Chapitre 3. Emboutissage 69

3.1. Introduction	69
3.2. Courbe limite de formage	71
3.3. Modélisation de l'emboutissage : problème incrémental	72
3.3.1. Modélisation de la tôle	73
3.3.2. Discrétisation spatiale : méthode des éléments finis	74
3.3.3. Choix de l'approximation de la tôle et de l'élément fini	75

3.4. Modélisation des outils	75
3.4.1. Maillage de la surface de l'outil en élément à géométrie simple . .	76
3.4.2. Représentation analytique des outils	76
3.4.3. Carreaux de Bézier	77
3.4.3.1. Approximation polynomiale d'une courbe	77
3.4.3.2. Approximation polynomiale d'une surface	78
3.4.3.3. Approximation polygonale d'une courbe	78
3.4.3.4. Approximation polygonale d'une surface	80
3.5. Traitement numérique de l'emboutissage	83
3.5.1. Position du problème	84
3.5.2. Méthode du lagrangien augmenté	86
3.6. Simulation numérique	90
3.6.1. Test de Sollac	90

Chapitre 4. Hydroformage 93

4.1. Introduction	93
4.2. Mise en forme par hydroformage	94
4.2.1. Hydroformage de tubes	95
4.2.2. Hydroformage de tôles	95
4.3. Instabilités plastiques dans la mise en forme par hydroformage	97
4.3.1. Flambement de tube	98
4.3.2. Plissement	98
4.3.3. Striction	100
4.3.4. Retour élastique	101
4.4. Courbe limite de formage (CLF)	102
4.5. Caractérisation du matériau pour l'hydroformage	103
4.5.1. Essai de traction	104
4.5.2. Essai d'expansion libre « Bulge test »	105
4.6. Modélisation analytique d'un essai de gonflage	106
4.6.1. Critère de Hill48 en contraintes planes	106
4.7. Simulation numérique	109
4.8. Caractéristique mécanique du comportement du tube	109

Chapitre 5. Fabrication additive 113

5.1. Introduction	113
5.2. Prototypage rapide et stratoconception	115
5.3. Définitions de la fabrication additive	117
5.4. Principe	121
5.4.1. Principe de la fusion/frittage laser sur lit de poudre	121
5.4.2. Principe de la fusion/frittage laser par projection de poudre	122
5.5. Fabrication additive dans la chaîne numérique	125

5.5.1. Concept « de l'objet à l'objet » 125
 5.5.2. Élément-clé de la chaîne numérique 125

Chapitre 6. Optimisation et fiabilité en mise en forme 129

6.1. Introduction 129
 6.2. Différentes approches d'optimisation des procédés 129
 6.2.1. Limitations des approches déterministes 132
 6.3. Caractérisation des procédés de mise en forme
 par des fonctions objectifs 133
 6.4. Optimisation déterministe et probabiliste d'un tube en T 133
 6.4.1. Choix de la fonction objectif et définition des contraintes 135
 6.4.2. Choix des paramètres incertains 135
 6.4.3. Construction de la fonction objectif et des contraintes 136
 6.4.4. Formulation déterministe du problème d'optimisation 139
 6.4.5. Formulation probabiliste du problème d'optimisation 141
 6.4.6. Sensibilité des optimums aux incertitudes 148
 6.5. Optimisation déterministe et fiabiliste d'un tube avec deux zones
 d'expansion 151
 6.5.1. Formulation déterministe et fiabiliste du problème
 d'optimisation 155
 6.6. Optimisation fiabiliste de l'hydroformage d'une tôle circulaire 155
 6.6.1. Construction de la fonction objectif et des contraintes 158
 6.6.2. Diagramme des effets 160
 6.6.3. Résolution déterministe du problème d'optimisation 164
 6.6.4. Résolution fiabiliste du problème d'optimisation 164
 6.6.5. Effet des incertitudes sur les variables optimales 168
 6.7. Optimisation déterministe et robuste d'une plaque carrée 170
 6.7.1. Résolution robuste du problème d'optimisation 175
 6.8. Optimisation de la tôle mince 177

Chapitre 7. Application des métamodèles à l'hydroformage 181

7.1. Introduction 181
 7.2. Sources d'incertitudes dans la mise en forme 182
 7.3. Critères de défaillance 183
 7.3.1. Critères de défaillance pour la striction 184
 7.3.2. Critères de défaillance pour le plissement 184
 7.4. Stratégie d'évaluation de la probabilité de défaillance 185
 7.4.1. Modèle éléments finis et choix des paramètres incertains 186
 7.4.2. Identification des modes de défaillance et définition
 des états limites 189
 7.4.3. Identification des éléments et des zones critiques 191
 7.5. Caractérisation probabiliste des déformations critiques 195
 7.5.1. Choix du plan d'expériences numérique 196

7.5.2. Construction des métamodèles	197
7.5.3. Validation et analyse statistique des métamodèles	197
7.5.4. Ajustement des distributions	198
7.5.4.1. Ajustement de la distribution de la déformation majeure de striction	200
7.5.4.2. Ajustement de la distribution de la déformation mineure de striction	201
7.5.4.3. Ajustement de la distribution de la déformation majeure de plissement	202
7.5.4.4. Ajustement de la distribution de la déformation mineure de plissement	203
7.6. Etude probabiliste de la striction et du plissement	204
7.7. Effets des corrélations sur la probabilité de défaillances	208
7.7.1. Estimation spatiale de la probabilité de défaillances	209
Chapitre 8. Identification des paramètres en mise en forme	211
8.1. Introduction	211
8.2. Méthodes d'identification	211
8.2.1. Test de validation	212
8.3. Hydroformage du tube soudé	214
8.3.1. Hydroformage de tôle mince	217
Annexe A. Optimisation en mécanique	223
Annexe B. Fiabilité en mécanique	231
Annexe C. Métamodèles	241
Bibliographie	251
Index	259