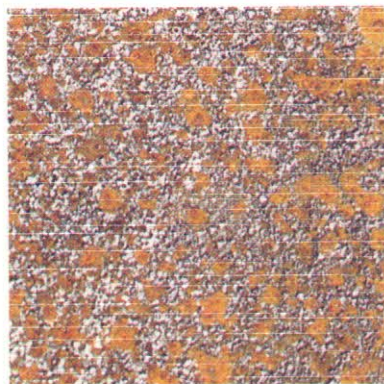


Mécanique et Ingénierie des Matériaux

Procédés et applications industrielles du soudage



sous la direction de
Régis Blondeau

hermes

Lavoisier

Table des matières

Avant-propos	15
Chapitre 1. Soudage des tôles minces en acier, nues et revêtues.	19
Gilles RIGAUT, Olivier DIERAERT, Pascal VERRIER, Joël CLAEYS	
1.1. Le soudage par points	20
1.1.1. Principe	20
1.1.2. Essais de soudabilité par point d'un produit	21
1.1.2.1. Le domaine de soudabilité	22
1.1.2.2. La durée de vie des électrodes	23
1.1.3. Soudabilité par points des tôles minces d'acier	24
1.1.3.1. Tôles à revêtement métallique	25
1.1.3.2. Le soudage par points en courant continu	27
1.1.3.3. Tôles à revêtement organique	28
1.1.3.4. Tôles à très haute résistance	29
1.2. Le soudage à la molette	32
1.2.1. Le soudage molette par écrasement ou <i>mash welding</i>	33
1.2.2. Le soudage molette par recouvrement	34
1.2.3. Cas d'applications étudiés ou traités en clientèle	35
1.3. Le soudage laser des tôles minces	36
1.3.1. Principe du soudage laser par <i>keyhole</i>	37
1.3.2. Le soudage bout à bout	39
1.3.2.1. Influence des paramètres opératoires de soudage	40
1.3.2.2. Les contraintes du soudage bout à bout par faisceau laser	40
1.3.2.3. Le soudage laser des aciers à très hautes caractéristiques mécaniques	42
1.3.2.4. Le soudage des aciers revêtus	43
1.3.2.5. Les flans raboutés laser pour l'industrie automobile.	45
1.3.3. Le soudage par recouvrement	46

1.4. Soudage à l'arc	47
1.4.1. Le soudage TIG.	48
1.4.2. Le soudage MAG.	49
1.5. Bibliographie	54

Chapitre 2. Le soudage des pièces en acier des organes mécaniques 57

Yves DESALOS et Gérard PRADERE

2.1. Introduction	57
2.2. Spécificités des liaisons par soudage en construction mécanique	59
2.2.1. Opportunités du soudage et préconisations générales	59
2.2.2. Risques métallurgiques de défauts dans la zone fondue et la zone affectée thermiquement	61
2.2.2.1. Défauts en zone fondue	62
2.2.2.2. Différents types de fissuration	63
2.2.3. Limites de soudabilité après soudage avec et sans refusion.	64
2.2.3.1. Principales conséquences d'une refusion importante	64
2.2.3.2. Défragilisation des ZAT	65
2.2.3.3. Soudage sans refusion	66
2.3. Principaux types de soudage pour les pièces mécaniques	67
2.3.1. Soudages à l'arc électrique et variantes.	68
2.3.1.1. Différentes familles	68
2.3.1.2. Un exemple : soudage à l'arc de la fusée de roue sur le bol-fusée	69
2.3.2. Soudages à ZAT réduite avec source à haute densité d'énergie : faisceaux laser, FE, plasma	72
2.3.2.1. Différentes familles	72
2.3.2.2. Qualité métallurgique	75
2.3.2.3. Exemples de réalisations	76
2.3.3. Soudage par friction	78
2.3.3.1. Principe	78
2.3.3.2. Exemples de réalisation.	81
2.3.4. Soudage en bout par effet Joule	83
2.3.4.1. Principe	83
2.3.4.2. Exemple : soudage embout-tube sur arbre à cames	85
2.3.5. Soudage-diffusion en phase solide	87
2.3.5.1. Description et caractéristiques.	88
2.3.5.2. Domaine d'application potentiel	89
2.4. Spécifications et contrôle qualité des soudures pour ces pièces.	90
2.4.1. Le cahier des charges qualité de la soudure (CdC)	91
2.4.1.1. Contenu	91
2.4.1.2. Le cahier des charges de base	94
2.4.1.3. Le cahier des charges définitif.	94
2.4.2. Le plan d'assurance qualité de la soudure	95

2.4.2.1. Contenu	95
2.4.2.2. Un exemple de plan d'assurance qualité.	99
2.5. Développements et tendances.	99
2.5.1. Evolution du contexte	99
2.5.2. Les procédés bien placés	99
2.6. Conclusions	101
2.7. Bibliographie	103

Chapitre 3. Le soudage des constructions métalliques 105

Jean-Pierre PESCATORE et Jean-Henri BORGEOT

3.1. Introduction	105
3.1.1. Historique	105
3.1.2. Domaine d'activité.	107
3.2. Aciers pour constructions métalliques.	108
3.2.1. Nuances et qualités.	108
3.2.2. Aciers utilisés	109
3.3. Procédés et techniques de soudage en construction métallique.	110
3.3.1. Tableau des procédés usuels	110
3.3.2. Opération préalable : pointage	111
3.3.3. Techniques particulières de soudage	111
3.3.3.1. Banc d'assemblage horizontal	111
3.3.3.2. Banc d'assemblage vertical	112
3.3.3.3. Fusion-forgeage	112
3.3.3.4. Aluminothermie	113
3.3.4. Positions usuelles de soudage	113
3.3.5. Préparation des bords : les chanfreins.	113
3.4. Déformations de soudage	115
3.4.1. Précautions d'exécution	115
3.4.2. Redressage.	117
3.5. Défauts et préventions	117
3.5.1. Fissures.	117
3.5.1.1. Fissures par arrachement lamellaire	117
3.5.1.2. Fissures à froid	118
3.5.2. Ruptures	118
3.5.2.1. Rupture fragile	118
3.5.2.2. Rupture par fatigue	119
3.5.3. Autres précautions thermiques et mécaniques.	119
3.5.3.1. Dégourdissage	119
3.5.3.2. Préchauffage	119
3.5.3.3. Postchauffage.	119
3.5.3.4. Traitement thermique	120
3.6. Spécificités du contrôle non destructif des constructions métalliques	120
3.7. Perspectives de développement.	120

Chapitre 4. Le soudage des gros composants dans l'industrie nucléaire . . .	121
François FAURE et Léon DUNAND-ROUX	
4.1. Présentation générale d'une chaudière à eau pressurisée.	121
4.2. Principaux matériaux utilisés pour la fabrication	123
4.2.1. Principe du choix des matériaux – Code de construction	123
4.2.2. Matériaux d'enceinte sous pression en acier faiblement allié.	123
4.2.3. Circuits en acier inoxydable austénitique	125
4.2.4. Pièces en alliage de nickel	126
4.3. Soudage des gros composants en acier faiblement allié	128
4.3.1. Caractéristiques visées.	128
4.3.2. Description du mode opératoire	128
4.3.3. Soudage à l'électrode enrobée	133
4.4. Revêtements	133
4.4.1. Mode de réalisation du revêtement	134
4.4.2. Contrôle du revêtement	135
4.5. Soudage des circuits en acier inoxydable.	136
4.6. Liaisons bimétalliques	139
4.7. Soudage des tubes de générateurs de vapeur.	140
4.8. Conclusions	142
Chapitre 5. Le soudage des aciers inoxydables	143
Jean-Louis MOIRON	
5.1. Définitions	143
5.2. Les grandes familles d'aciers inoxydables	143
5.3. Les structures métallurgiques.	145
5.4. Les diagrammes de constitution	148
5.4.1. Introduction	148
5.4.2. Formules de calcul des équivalents	148
5.4.3. Diagrammes de constitution	149
5.5. Le soudage des aciers inoxydables ferritiques.	154
5.5.1. Introduction	154
5.5.2. Risques encourus en soudage.	155
5.5.3. La stabilisation	156
5.5.4. Les risques de fragilisation	157
5.5.5. Les produits d'apport	158
5.5.6. Les gaz de protection	159
5.5.7. Synthèse – conclusion partielle	159
5.6. Le soudage des aciers inoxydables martensitiques	160
5.6.1. Introduction	160
5.6.2. Liste des aciers inoxydables martensitiques	161
5.6.3. Effet des éléments C, Cr et Ni sur la boucle γ	161
5.6.4. Soudabilité métallurgique des aciers inoxydables martensitiques	162
5.6.5. Conclusion – synthèse partielle	164

5.7. Le soudage des aciers inoxydables austénitiques	164
5.7.1. Introduction	164
5.7.2. Les risques encourus lors du soudage.	164
5.7.3. Précipitation de carbures	165
5.7.4. Fissuration à chaud.	166
5.7.5. La phase sigma	168
5.7.6. Produits d'apport	168
5.7.7. Gaz de protection.	168
5.8. Le soudage des aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex)	169
5.8.1. Introduction	169
5.8.2. Les risques encourus en soudage	169
5.8.3. Les principaux aciers inoxydables austéno-ferritiques.	170
5.8.4. Soudabilité des aciers austéno-ferritiques	171
5.8.5. Produits d'apport	172
5.8.6. Gaz de protection.	172
5.9. Soudage hétérogène	173
5.9.1. Rappel de définitions	173
5.9.2. Traitement et prévision des soudages hétérogènes	173
5.10. Parachèvement des soudures	175
5.11. Glossaire	176
5.12. Bibliographie.	177

Chapitre 6. Soudage des alliages d'aluminium 179

Michel COURBIÈRE

6.1. Métallurgie du soudage	179
6.1.1. Soudabilité des alliages d'aluminium (comparatif aciers/aluminium)	179
6.1.2. Les métaux d'apport	182
6.2. Techniques de soudage.	186
6.2.1. Introduction	186
6.2.2. Les procédés de soudage à l'arc (TIG-MIG)	187
6.2.2.1. TIG courant alternatif.	188
6.2.2.2. TIG courant continu et à courant pulsé.	189
6.2.2.3. Metal Inert Gas.	190
6.2.3. Soudage électrique par résistance	193
6.2.4. Soudage par étincelage	194
6.2.5. Soudage par friction et friction à l'outil	195
6.2.6. Soudage par faisceau d'électrons	197
6.2.7. Soudage laser	198
6.2.8. Autres techniques.	199
6.3. Préparation et mise en œuvre des demi-produits aluminium pour le soudage	200
6.3.1. Particularisme des surfaces des alliages d'aluminium	200

6.3.2. Stockage	201
6.3.3. Préparation des surfaces.	201
6.3.4. Nettoyage des cordons de soudure.	202
6.4. Les déformations	203
6.4.1. Généralités.	203
6.4.2. Comparatif acier/aluminium (déformations au chauffage)	204
6.4.3. Retraits	207
6.4.4. Règles de base.	207
6.5. Dimensionnement des structures soudées.	210
6.5.1. Statique.	210
6.5.2. Dimensionnement en fatigue.	213
6.5.3. Règles de l'utilisation optimale des structures soudées	213
6.6. Les défauts de soudage.	214
6.7. Hygiène et sécurité	217
6.8. Bibliographie	217

Chapitre 7. Normalisation, organisation et contrôle de la qualité

en soudage	219
Jean-Paul GOURMELON	
7.1. Introduction	219
7.2. Les normes d'organisation générale de la qualité	220
7.2.1. Présentation	220
7.2.2. Principes	220
7.2.3. Analyse.	222
7.2.3.1. Activités de soudage.	223
7.2.3.2. Personnel chargé du soudage et des contrôles	223
7.2.3.3. Contrôles, examens et essais.	224
7.3. Les normes de qualification de modes opératoires	224
7.4. Les normes de contrôles non destructifs	229
7.5. Conclusion	232

Index	233
------------------------	------------