



Les aciers **inoxydables duplex**
 sous la direction de Iris Alvarez-Armas, Suzanne Degallaix-Moreuil
 Hermès science publications, Paris
 Lavoisier, Paris
 Traité MIM-Mécanique et ingénierie des matériaux. Matériaux et métallurgie
 ISBN: 978-2-7462-2457-5

Table des Matières

Les aciers inoxydables duplex

Lavoisier

Avant-propos	17
Iris Alvarez-Armas et Suzanne Degallaix-Moreuil	
Chapitre 1. Procédé : formabilité à chaud	21
Isabel Gutierrez et Amaia Iza-Mendia	
1.1. Introduction	21
1.2. Microstructure brut de coulée	21
1.3. Evolution des microstructures au cours du travail à chaud	24
1.3.1. Changements dans la morphologie et la distribution de la phase dispersée Gamma	26
1.3.2. La déformation plastique	27
1.3.3. Rotation	31
1.3.4. Glissement au joint d'interphase	32
1.3.5. Création de bandes de cisaillement	34
1.3.6. Fragmentation	35
1.4. Comportement mécanique pendant la mise en forme à chaud	37
1.4.1. Lois de comportement	37
1.4.2. Fractions volumiques de phases et rapport des résistances	39
1.4.3. Composition et répartition des éléments	40
1.4.4. La règle des deux phases	42
1.4.5. Distribution des déformations	44
1.4.6. Mode de déformation et morphologie des phases	46
1.4.7. Microstructures orientées axialement et déformées par cisaillement pur	47
1.5. Adoucissement statique	50
1.6. Formabilité à chaud	54
1.6.1. Effet de la composition	54
1.6.2. Microstructures brut de coulée	55
1.6.3. Ductilité à chaud	56
1.6.4. Sources d'échec	58
1.6.5. Séquences à passes multiples	61
1.7. Conclusion	62
1.8. Remerciements	62

1.9. Bibliographie	62
Chapitre 2. Propriétés de résistance à la corrosion	71
Jacques Charles	
2.1. Introduction	71
2.2. Les nuances duplex et les nombres équivalents de résistance à la corrosion par piqûres	72
2.2.1. Compositions chimiques des principales nuances duplex commercialisées	72
2.2.2. Le cas spécifique de l'azote	73
2.3. Quelques principes fondamentaux concernant la résistance à la corrosion des aciers inoxydables	74
2.3.1. Considérations générales	74
2.3.2. Quelques définitions	76
2.3.3. Paramètres influant sur la résistance à la corrosion des nuances duplex	78
2.4. Les différentes formes de corrosion	85
2.4.1. Considérations générales	85
2.4.2. Corrosion généralisée	86
2.4.3. Piqûres et crevasses	100
2.4.4. Corrosion intergranulaire (CIG)	115
2.4.5. Corrosion sous contrainte (CSC)	119
2.4.6. Fatigue et fatigue-corrosion	126
2.5. Quelques comportements de corrosion complexes rencontrés dans les applications industrielles	129
2.5.1. Environnements marins et applications en eau de mer	129
2.5.2. Usines de dessalement (ou désalinisation) thermique	131
2.5.3. Expériences industrielles dans des environnements sévères contenant des chlorures	133
2.5.4. Industries pétrolière et gazière	134
2.5.5. Equipements de contrôle de pollution pour la désulfuration des fumées dans les centrales thermiques au charbon	136
2.5.6. Autres applications industrielles	138
2.5.7. Bâtiment et construction	139
2.6. Conclusion	140
2.7. Bibliographie	141
Chapitre 3. Transformations de phase et microstructure	145
Angelo Fernando Padilha et Ronald Lesley Plaut	
3.1. Introduction	145
3.2. Diagrammes de phase et phases typiques	147
3.3. Solidification	149
3.4. Précipitation de l'austénite	151
3.5. Changements de phase ayant lieu en deçà de 1 000°C	154
3.5.1. Précipitation de carbures de chrome ($M_{23}C_6$)	154
3.5.2. Précipitation de nitrures de chrome (Cr_2N)	155
3.5.3. Précipitation de la phase chi	156

3.5.4. Précipitation de la phase sigma (Sigma)	157
3.5.5. Formation de phase alpha prime (Alpha')	160
3.6. Travail à froid et recuit	162
3.7. Remarques finales	165
3.8. Bibliographie	166
Chapitre 4. Procédés de soudage, évolutions microstructurales et propriétés finales des aciers inoxydables duplex et superduplex	171
Franco Bonollo, Alberto Tiziani et Paolo Ferro	
4.1. Introduction	171
4.2. Transformation ferrite Delta -> austénite	172
4.3. Précipitation de phases secondaires et intermétalliques pendant le soudage	175
4.4. Procédés de soudage des aciers inoxydables duplex et superduplex	177
4.4.1. Procédés conventionnels de soudage à l'arc	178
4.4.2. Procédés de soudage innovants à haute densité de puissance	180
4.5. Remarques finales	185
4.6. Bibliographie	186
Chapitre 5. Fragilisation thermique des aciers inoxydables duplex moulés : observations et modélisation	191
André Pineau et Jacques Besson	
5.1. Introduction	191
5.2. Composition, élaboration, microstructure et propriétés mécaniques	193
5.2.1. Influence de la composition chimique	193
5.2.2. Solidification des aciers DSS	195
5.2.3. Microstructure des aciers DSS CF8M moulés	197
5.2.4. Propriétés mécaniques des DSS	199
5.3. Fragilisation thermique de la phase ferrite dans les DSS	199
5.3.1. Aciers inoxydables binaires Fe-Cr	199
5.3.2. DSS : démixtion Alpha/Alpha', phase G et autres réactions de précipitation	203
5.3.3. Aciers DSS : conséquences du vieillissement thermique sur les propriétés mécaniques	206
5.4. Matériaux étudiés et traitements thermiques de fragilisation	211
5.4.1. Matériaux - traitements thermiques	211
5.4.2. Propriétés mécaniques	213
5.5. Endommagement et rupture	216
5.6. Effet d'échelle et dispersion	219
5.7. Modélisation de la rupture	223
5.7.1. Lois de comportement	223
5.7.2. Modélisation des hétérogénéités des matériaux	225
5.7.3. Rôle des hétérogénéités	226
5.7.4. Modéliser l'effet de taille	227
5.7.5. Comparaison avec les résultats expérimentaux	228
5.8. Conclusion	231

5.9. Bibliographie	231
Chapitre 6. Fatigue oligocyclique à température ambiante	239
Iris Alvarez-Armas	
6.1. Introduction	239
6.2. Processus de durcissement/adoucissement cyclique	240
6.2.1. Caractéristiques de base de la déformation cyclique	240
6.2.2. Analyse et présentation des résultats	242
6.3. Plasticité cyclique uniaxiale dans les aciers inoxydables duplex	251
6.3.1. Première génération : aciers inoxydables duplex à faible teneur en azote	252
6.3.2. Deuxième génération : aciers duplex standard et fortement alliés	254
6.3.3. Troisième génération : aciers superduplex	257
6.3.4. Rôle de l'alliage à l'azote dans les aciers inoxydables duplex	261
6.3.5. Comportement de la contrainte de frottement pendant le cyclage et son influence sur l'adoucissement cyclique	266
6.4. Conclusion	269
6.5. Remerciements	270
6.6. Bibliographie	270
Chapitre 7. Comportement en fatigue oligocyclique multiaxiale à température ambiante	275
Suzanne Degallaix-Moreuil	
7.1. Introduction	275
7.2. Fatigue oligocyclique multiaxiale - introduction	276
7.2.1. Fatigue oligocyclique multiaxiale : éprouvettes et essais	276
7.2.2. Définitions	277
7.2.3. Procédure d'essai	279
7.2.4. Durées de vie en fatigue oligocyclique multiaxiale	280
7.2.5. Présentation des résultats	280
7.2.6. Effet d'histoire	280
7.2.7. Comportement de rochet	281
7.3. Fatigue oligocyclique biaxiale d'un acier inoxydable duplex type 25-07	282
7.3.1. Introduction	282
7.3.2. Matériau, éprouvettes, et dispositif expérimental	283
7.3.3. Conditions des essais de fatigue oligocyclique	286
7.3.4. Comportement cyclique multiaxial	288
7.3.5. Durées de vie en fatigue oligocyclique multiaxiale	296
7.3.6. Comportement de rochet	297
7.3.7. Evolutions microstructurales en fatigue oligocyclique multiaxiale	300
7.4. Conclusion	306
7.5. Remerciements	307
7.6. Bibliographie	307
Chapitre 8. Etude du partage de la plasticité cyclique dans l'acier inoxydable duplex 25Cr-7Ni-0,25N par microscopie à force atomique	313
Jean-Bernard Vogt, Daniel Salazar et Ingrid Proriot Serre	

8.1. Introduction	313
8.2. Matériau	315
8.3. Procédure expérimentale	316
8.3.1. Essais de fatigue	316
8.3.2. AFM	318
8.3.3. MEB	318
8.4. Comportement cyclique à faible variation de déformation	318
8.4.1. Méthodologie	319
8.4.2. Analyse qualitative du relief de la surface après essai de fatigue	320
8.4.3. Influence du traitement thermique sur la population de grains d'austénite impliqués dans l'activité de la déformation plastique	322
8.4.4. Estimation de la déformation plastique irréversible à partir de mesures par AFM	324
8.4.5. Conclusion partielle	328
8.5. Comportement cyclique à forte variation de déformation	328
8.5.1. Identification des bandes de glissement	329
8.5.2. Evolution du relief au cours du cyclage	332
8.5.3. Rôle des paramètres cristallographiques	336
8.5.4. Rôle de la distribution des phases sur l'activité plastique de la ferrite	338
8.5.5. Remarques de conclusion	340
8.6. Conclusion	341
8.7. Bibliographie	341
Chapitre 9. Modélisation micro-macro du comportement mécanique monotone et cyclique d'un acier inoxydable duplex forgé	345
Véronique Aubin et Pierre Evrard	
9.1. Introduction	345
9.2. Modélisation macroscopique du comportement mécanique	346
9.2.1. Cadre thermodynamique	346
9.2.2. Formulation générale des lois de comportement pour la description du comportement mécanique élastoplastique	347
9.2.3. Modèle de base	349
9.2.4. Modélisation du surécrouissage	355
9.2.5. Conclusion	360
9.3. Modélisation micromécanique	360
9.3.1. Introduction	360
9.3.2. Représentation du matériau	361
9.3.3. Etape de localisation	363
9.3.4. Loi de comportement du grain	364
9.3.5. Etape d'homogénéisation	366
9.3.6. Identification des paramètres du modèle	366
9.3.7. Validation du modèle polycristallin biphasé	368
9.3.8. Modélisation de l'adoucissement cyclique	371
9.3.9. Conclusion	374
9.4. Conclusion générale	374

9.5. Bibliographie	376
Chapitre 10. Fatigue oligocyclique aux températures intermédiaires	381
Alberto F. Armas	
10.1. Introduction	381
10.2. Matériaux étudiés	384
10.3. Acier inoxydable duplex nuance UNS S32900	387
10.3.1. Acier non vieilli (état de réception)	387
10.3.2. Acier vieilli	392
10.4. Acier inoxydable superduplex nuance UNS S32750	395
10.4.1. Acier non vieilli	395
10.4.2. Acier inoxydable superduplex vieilli	398
10.5. Influence de la température sur la durée de vie en fatigue	404
10.6. Conclusion	406
10.7. Remerciements	407
10.8. Bibliographie	407
Chapitre 11. Procédés industriels et réponse en fatigue des aciers inoxydables duplex	411
Nuri Akdut	
11.1. Introduction	411
11.2. Aspects morphologiques	414
11.3. Rôle de la texture morphologique sur la réponse en fatigue	416
11.3.1. Rôle de la direction de la sollicitation en fatigue	416
11.3.2. Rôle de la texture et de l'échelle morphologique	418
11.4. Rôle de la teneur en azote sur la réponse en fatigue des aciers inoxydables duplex	419
11.4.1. L'azote et ses effets sur l'EDE dans l'austénite	424
11.4.2. Effet de l'azote sur les durées de vie en fatigue des aciers inoxydables duplex	426
11.5. Plasticité cyclique et fatigue des aciers inoxydables duplex alliés à l'azote - effet de l'adoucissement cyclique	429
11.5.1. Déformation cyclique sous contrôle de la déformation plastique	431
11.5.2. Effet du mode de contrôle des essais cycliques et de la teneur en azote sur l'adoucissement cyclique	433
11.5.3. Réponse contrainte-déformation cyclique (CEC) des aciers inoxydables duplex	436
11.5.4. Durées de vie en fatigue des aciers inoxydables duplex en fonction de la morphologie des phases et de la teneur en azote	439
11.6. Conclusion	442
11.7. Bibliographie	443
Chapitre 12. Applications	451
Mats Liljas et Fredrik Sjöholm	
12.1. Introduction	451
12.2. Histoire des aciers inoxydables duplex	452
12.3. Nuances inoxydables duplex actuelles (modernes)	457
12.4. Applications modernes	458

12.4.1. Pétrole et gaz	459
12.4.2. Industrie papetière	461
12.4.3. Désalinisation	464
12.4.4. Transport	466
12.4.5. Réservoirs de stockage	467
12.4.6. Hydrométallurgie	468
12.4.7. Contrôle de pollution/nettoyage des fumées	469
12.4.8. Construction	470
12.4.9. Chaudières à eau chaude	471
12.5. Conclusion	472
12.6. Bibliographie	473
Index	475