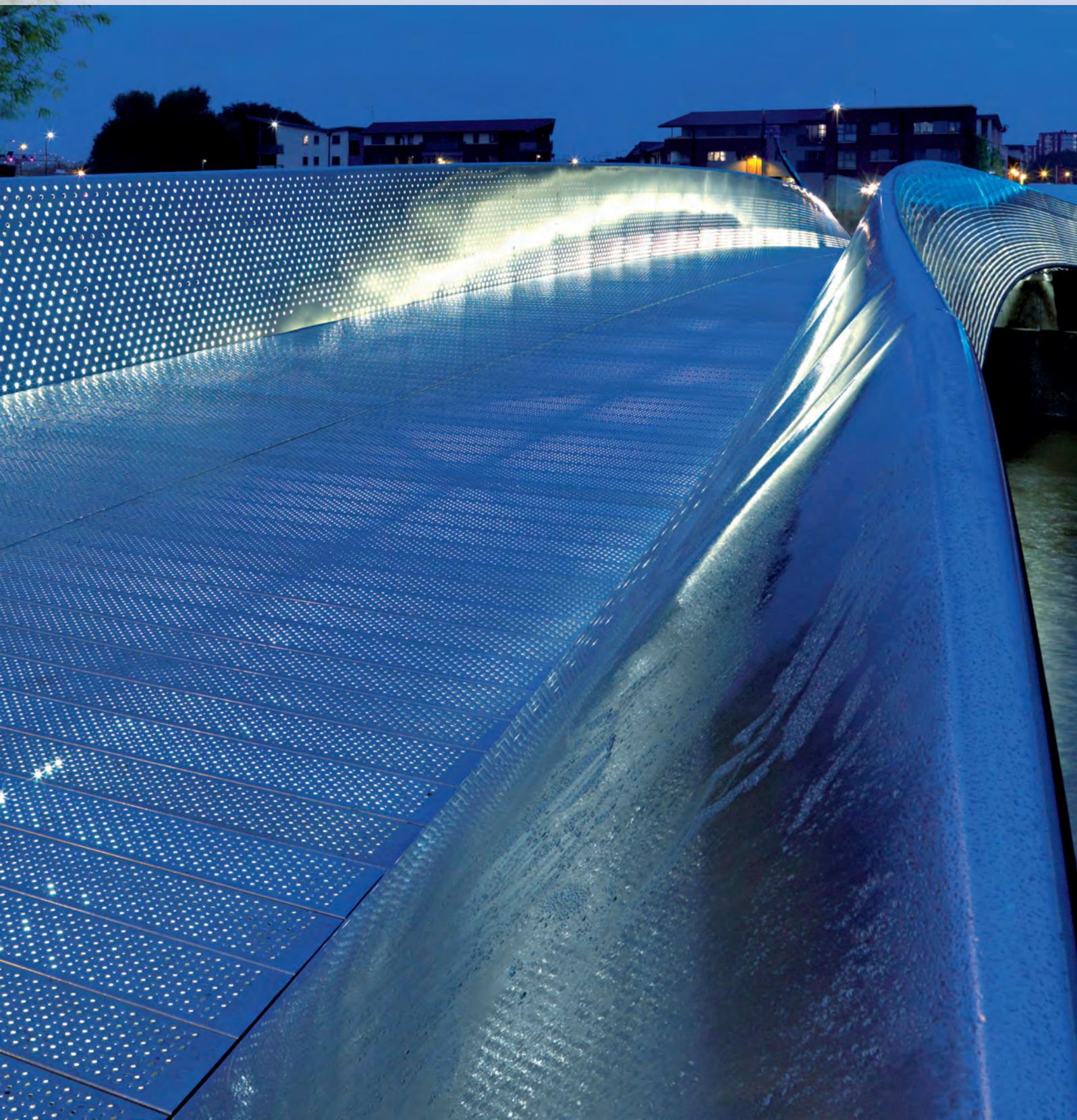


Guide pratique pour le travail des aciers inoxydables duplex



**Guide pratique pour le travail des aciers
inoxydables duplex**

Première édition 2011

© IMOA 1999-2011

ISBN 978-1-907470-05-9

Edité par l'International Molybdenum Association
(IMOA), Londres, GB

www.imoa.info

info@imoa.info

Elaboré par TMR Stainless, Pittsburgh, PA, USA

Conception et maquette : circa drei, Munich, D

Traduction : Chantal Pradines, Trampot, F

Remerciements :

IMOA tient à remercier l'International Stainless Steel Forum et Euro Inox pour leur aide et pour leur précieuse relecture du manuel. IMOA remercie également Acerinox, Allegheny Ludlum, Aperam, Aquatech, Baosteel, Columbus Stainless, JSL Limited, Nippon Yakin Kogyo, North American Stainless, Outokumpu Stainless, Sandvik, Swagelok et Yieh United Steel Corporation pour leurs contributions et leurs commentaires détaillés.

IMOA (International Molybdenum Association) a fait son possible pour s'assurer que l'information présentée soit techniquement correcte. Toutefois, IMOA ne représente ni ne garantit l'exactitude des informations contenues dans cette brochure ou sa pertinence pour un usage général ou spécifique. Le lecteur est avisé que le contenu de la brochure sert d'information uniquement ; il n'est pas conçu pour se substituer aux procédures à suivre et ne doit pas être utilisé ou invoqué en cas d'application spécifique ou générale sans obtenir des conseils compétents au préalable. IMOA, ses membres, les membres de son personnel et ses consultants déclinent expressément toute responsabilité de quelque nature qu'elle soit pour les pertes, dommages ou blessures résultant de l'utilisation des informations contenues dans cette publication. Les spécifications internationales ASTM et EN ont été principalement utilisées dans la présente publication ; néanmoins, les spécifications de matériaux peuvent varier selon les pays.

**Photo de couverture : Meads Reach, Temple Quai, Bristol, GB
(source : www.m-tec.uk.com (constructeur), www.photogenics.com (photo))**

Table des matières

1	Introduction	4	12	Soudage	36
2	Histoire des aciers inoxydables duplex	5	12.1	Recommandations générales	36
3	Composition chimique et rôle des éléments d'alliage	8	12.1.1	Différences entre aciers duplex et aciers austénitiques	36
3.1	Composition chimique	8	12.1.2	Choix du matériau de base	36
3.2	Rôle des éléments d'alliage	8	12.1.3	Nettoyage avant soudage	36
4	Métallurgie des aciers inoxydables duplex	10	12.1.4	Conception des joints	36
5	Résistance à la corrosion	13	12.1.5	Préchauffage	38
5.1	Résistance aux acides	13	12.1.6	Apport thermique et température interpassé	38
5.2	Résistance aux bases	14	12.1.7	Traitement thermique post-soudage	38
5.3	Résistance à la corrosion par piqûres et résistance à la corrosion caverneuse	14	12.1.8	Équilibrage des phases	38
5.4	Résistance à la corrosion fissurante sous contrainte	16	12.1.9	Soudage de métaux dissemblables	39
6	Spécifications des utilisateurs finaux et contrôle de la qualité	18	12.2	Qualification des modes opératoires de soudage	40
6.1	Spécifications standard	18	12.3	Procédés de soudage	40
6.1.1	Composition chimique	18	12.3.1	Soudage TIG avec électrode réfractaire et gaz inerte	40
6.1.2	Recuit de mise en solution	18	12.3.2	Soudage MIG avec fil fusible et gaz inerte	42
6.2	Spécifications particulières	19	12.3.3	Soudage à l'arc avec fil fourré	44
6.2.1	Essais de traction et essais de dureté	19	12.3.4	Soudage à l'arc à l'électrode enrobée	44
6.2.2	Essais de pliage	19	12.3.5	Soudage à l'arc submergé	46
6.2.3	Essais de choc et examens métallographiques (phases intermétalliques)	20	12.3.6	Soudage par faisceau d'électrons et soudage laser	46
6.2.4	Métallographie et mesures magnétiques (équilibre des phases)	20	12.3.7	Soudage par résistance	46
6.2.5	Essais de corrosion	21	13	Autres techniques d'assemblage	47
6.2.6	Soudage de production et contrôle des soudures	22	13.1	Préparation des joints	47
7	Propriétés mécaniques	23	13.2	Collage	47
8	Propriétés physiques	26	13.3	Brasage tendre	47
9	Découpage	28	13.4	Brasage fort	48
9.1	Sciage	28	14	Nettoyage post-fabrication	49
9.2	Cisaillage	28	14.1	Traces de crayon gras, peintures, salissures, huiles	49
9.3	Refendage	28	14.2	Contamination ferreuse	49
9.4	Poinçonnage	28	14.3	Projections de soudure, colorations thermiques, incrustation de flux et de laitier, coups d'arc	50
9.5	Découpe plasma et découpe laser	28	15	Applications des aciers inoxydables duplex	51
10	Formage	29		Pour aller plus loin	54
10.1	Formage à chaud	29		Bibliographie	57
10.1.1	Recuit de mise en solution	29		Annexe 1	
10.2	Formage à température modérée	30		Désignations des aciers inoxydables duplex et appellations commerciales des produits	58
10.3	Formage à froid	30		Annexe 2	
10.4	Emboutissage	31		Récapitulatif des normes	60
10.5	Repoussage	31			
11	Usinage	32			
11.1	Recommandations générales	32			
11.2	Tournage	33			
11.3	Fraisage en bout tenace	34			
11.4	Perçage	34			

1 Introduction

Les aciers inoxydables duplex constituent une famille de nuances d'acier combinant à la fois une bonne résistance à la corrosion, une résistance mécanique élevée et une mise en œuvre aisée. Leurs propriétés physiques se situent entre celles des aciers inoxydables austénitiques et celles des aciers inoxydables ferritiques, plus près, toutefois, des aciers ferritiques et des aciers au carbone. Leurs bonnes performances en matière de résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion caverneuse en milieu chloruré sont liées à leur teneur en chrome, en molybdène, en tungstène et en azote. Ces performances peuvent s'apparenter à celles des aciers EN 1.4401 (AISI 316),

voire dépasser celles des aciers inoxydables utilisés dans les applications marines, tels les aciers austénitiques à 6 % Mo. Leur résistance à la corrosion sous contrainte en milieu chloruré est nettement supérieure à celle des aciers inoxydables austénitiques de la série AISI 300. En termes de résistance mécanique, les aciers duplex présentent tous des performances significativement supérieures à celle des nuances austénitiques, avec en outre une bonne ductilité et une bonne ténacité.

S'il existe de nombreuses similitudes entre le travail des aciers inoxydables austénitiques et celui des aciers duplex, il existe aussi des différences importantes. La teneur élevée en alliages et la bonne résistance mécanique de ces derniers imposent un certain nombre d'ajustements. Le présent manuel s'adresse aux entreprises et aux utilisateurs impliqués dans le travail des aciers. Il regroupe à leur attention un ensemble d'informations pratiques, gages d'une mise en œuvre réussie des nuances duplex. On a admis que le lecteur avait une certaine expérience du travail des aciers inoxydables de sorte que les propriétés et les techniques sont abordées en mettant à chaque fois en regard les aciers duplex, les aciers austénitiques de la série AISI 300 et les aciers au carbone.

Le travail des aciers inoxydables duplex présente, certes, des différences par rapport aux autres aciers, mais ces différences ne constituent pas de difficultés particulières.



Pont en acier duplex à Stockholm, Suède (Source : Outokumpu)

2 Histoire des aciers inoxydables duplex

Les aciers inoxydables duplex, ces aciers inoxydables biphasés constitués d'austénite et de ferrite en proportions à peu près égales, existent depuis 80 ans déjà ; il s'agissait initialement d'alliages de chrome, de nickel, et de molybdène. Les premiers aciers duplex corroyés furent produits en Suède en 1930 où ils furent employés dans l'industrie du papier sulfite. Leur développement visait à réduire les problèmes de corrosion intergranulaire qui affectaient les premiers aciers austénitiques à haut carbone. Parallèlement, des pièces de fonderie en acier duplex furent produites en Finlande en 1930 également, et un brevet fut accordé en France en 1936 pour le précurseur de ce qui serait connu par la suite sous l'appellation Uranus 50. Après la deuxième guerre mondiale, on assista à un déploiement de l'acier AISI 329 (EN 1.4460), employé de manière intensive pour les tubulures des échangeurs de chaleur au contact de l'acide nitrique. Une des premières nuances duplex développées spécifiquement pour améliorer la résistance à la corrosion sous contrainte en milieu chloruré fut le 3RE60. Dans les années qui suivirent, à la fois des nuances duplex corroyées et des nuances moulées furent employées pour une grande variété d'applications dans l'industrie des procédés, notamment pour la fabrication de cuves, d'échangeurs de chaleur et de pompes.

Les performances de ces aciers duplex de première génération étaient intéressantes mais, à l'état brut de soudage, elles étaient limitées. La zone affectée thermiquement (ZAT) présentait à la fois une faible ténacité – en raison d'une quantité excessive de ferrite – et une tenue à la corrosion nettement inférieure à celle du métal de base. Ces limitations les confinèrent à quelques applications spécifiques, généralement non soudées. L'invention, en 1968, de la décarburation argon oxygène (Argon Oxygen Decarburization – AOD) pour l'affinage des aciers inoxydables ouvrit la voie à un large éventail de nouvelles nuances. Une des avancées fut ainsi la possibilité d'ajouter de l'azote comme élément d'alliage : l'azote permet la ténacité de la ZAT et une résistance à la corrosion après soudage proche de celle du métal de base. Avec une stabilité accrue de l'austénite, l'azote réduit également la vitesse de formation des phases intermétalliques dommageables.

Les aciers inoxydables duplex de seconde génération se caractérisent donc par la présence d'azote. Le développement commercial de ces nouveaux alliages, commencé à la fin des années 1970, coïncide avec l'exploitation des gisements de gaz et de pétrole de la mer du Nord, qui s'accompagnait d'une demande en aciers inoxydables présentant une excellente résistance à la corrosion en milieux chlorurés, une bonne aptitude à la mise en œuvre et une résistance mécanique élevée. C'est ainsi que l'acier duplex EN 1.4462 (2205) est devenu le champion de ces aciers de seconde génération et qu'il a été employé de manière intensive pour les gazoducs et les applications sur



Lessiveur continu et tour d'imprégnation utilisés dans la fabrication de pâte kraft, acier EN 1.4462 (2205), Södra Cell Mönsterås, Suède (Source : Kværner Pulping)

les plates-formes offshore. La résistance mécanique élevée de ces duplex de seconde génération permettait de réduire les épaisseurs de parois et donc le poids sur les plates-formes, avantages décisifs qui encourageaient fortement leur utilisation.

Comme les aciers inoxydables austénitiques, les aciers inoxydables duplex constituent une famille de nuances couvrant une gamme de performances anticorrosion étendue, fonction de leurs teneurs en alliages. Le développement des aciers duplex n'a cessé de se poursuivre au fil du temps, et les aciers duplex modernes peuvent être divisés en cinq groupes :

- lean duplex tels la nuance EN 1.4362 (2304), sans addition de Mo ;
- duplex standard tels l'acier EN 1.4462 (2205), un acier à toute épreuve, qui représente plus de 80 % des usages ;
- duplex 25 % Cr, tels le 255, avec un PREN* inférieur à 40
- superduplex (PREN 40–45), 25–26 % Cr à teneur accrue en Mo et en N par comparaison avec les nuances 25 % Cr usuelles (exemple : EN 1.4410 (2507)) ;
- hyperduplex, définis comme des aciers duplex fortement alliés, avec un PREN supérieur à 45.

*PREN = indice de résistance à la corrosion par piqûres = % Cr + 3,3 (% Mo + 0,5 % W) + 16 % N

Le Tableau 1 donne les compositions chimiques des aciers duplex de seconde génération, corroyés ou moulés. Les duplex de première génération et les aciers austénitiques courants sont inclus à titre de comparaison.

Note : tous les aciers inoxydables cités dans le texte sous leur désignation numérique ou leur appellation commerciale figurent dans le Tableau 1 ou à l'annexe 1.

Tableau 1 : Composition chimique (% massique) des aciers inoxydables duplex corroyés / moulés * (nuances austénitiques indiquées à titre de comparaison)

Nuance	N° UNS	N° EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Aciers duplex corroyés										
Nuances duplex de première génération										
329	S32900	1.4460	0,08	23,0–28,0	2,5–5,0	1,0–2,0	–	1,00	–	–
**	S31500	1.4424	0,03	18,0–19,0	4,3–5,2	2,5–3,0	0,05–0,1	–	–	–
	S32404		0,04	20,5–22,5	5,5–8,5	2,0–3,0	0,20	2,00	1,0–2,0	–
Nuances duplex de seconde génération										
Lean										
	S32001	1.4482	0,03	19,5–21,5	1,0–3,0	0,6	0,05–0,17	4,0–6,0	1,0	–
	S32101	1.4162	0,04	21,0–22,0	1,35–1,7	0,1–0,8	0,20–0,25	4,0–6,0	0,1–0,8	–
	S32202	1.4062	0,03	21,5–24,0	1,0–2,8	0,45	0,18–0,26	2,00	–	–
	S82011		0,03	20,5–23,5	1,0–2,0	0,1–1,0	0,15–0,27	2,0–3,0	0,5	–
2304	S32304	1.4362	0,03	21,5–24,5	3,0–5,5	0,05–0,6	0,05–0,20	2,50	0,05–0,60	–
		1.4655	0,03	22,0–24,0	3,5–5,5	0,1–0,6	0,05–0,20	2,00	1,0–3,0	–
Standard										
	S32003		0,03	19,5–22,5	3,0–4,0	1,5–2,0	0,14–0,20	2,00	–	–
2205	S31803	1.4462	0,03	21,0–23,0	4,5–6,5	2,5–3,5	0,08–0,20	2,00	–	–
2205	S32205	1.4462	0,03	22,0–23,0	4,5–6,5	3,0–3,5	0,14–0,20	2,00	–	–
25 % Cr										
	S31200		0,03	24,0–26,0	5,5–6,5	1,2–2,0	0,14–0,20	2,00	–	–
	S31260		0,03	24,0–26,0	5,5–7,5	2,5–3,5	0,10–0,30	1,00	0,2–0,8	0,1–0,5
	S32506		0,03	24,0–26,0	5,5–7,2	3,0–3,5	0,08–0,20	1,00	–	0,05–0,30
	S32520	1.4507	0,03	24,0–26,0	5,5–8,0	3,0–4,0	0,20–0,35	1,50	0,5–2,0	–
255	S32550	1.4507	0,04	24,0–27,0	4,5–6,5	2,9–3,9	0,10–0,25	1,50	1,5–2,5	–
Superduplex										
2507	S32750	1.4410	0,03	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–5,0	0,24–0,32	1,20	0,5	–
	S32760	1.4501	0,03	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–4,0	0,20–0,30	1,00	0,5–1,0	0,5–1,0
	S32808		0,03	27,0–27,9	7,0–8,2	0,8–1,2	0,30–0,40	1,10	–	2,1–2,5
	S32906		0,03	28,0–30,0	5,8–7,5	1,5–2,6	0,30–0,40	0,80–1,5	0,8	–
	S32950		0,03	26,0–29,0	3,5–5,2	1,0–2,5	0,15–0,35	2,00	–	–
	S39274		0,03	24,0–26,0	6,8–8,0	2,5–3,5	0,24–0,32	1,0	0,2–0,8	1,5–2,5
	S39277		0,025	24,0–26,0	6,5–8,0	3,0–4,0	0,23–0,33	0,80	1,2–2,0	0,8–1,2
		1.4477	0,03	28,0–30,0	5,8–7,5	1,5–2,6	0,30–0,40	0,80–1,50	≤0,8	–
Hyperduplex										
	S32707		0,03	26,0–29,0	5,5–9,5	4,0–5,0	0,30–0,50	1,50	1,0	–
	S33207		0,03	29,0–33,0	6,0–9,0	3,0–5,0	0,40–0,60	1,50	1,0	–

Nuance	N° UNS	N° EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Aciers austénitiques corroyés										
304L	S30403	1.4307	0,03	17,5–19,5	8,0–12,0	–	0,10	2,00	–	–
316L	S31603	1.4404	0,03	16,0–18,0	10,0–14,0	2,0–3,0	0,10	2,00	–	–
317L	S31703	1.4438	0,03	18,0–20,0	11,0–15,0	3,0–4,0	0,10	2,00	–	–
317LMN	S31726	1.4439	0,03	17,0–20,0	13,5–17,5	4,0–5,0	0,10–0,20	2,00	–	–
904L	N08904	1.4539	0,02	19,0–23,0	23,0–28,0	4,0–5,0	0,10	2,00	1,0–2,0	–
Aciers duplex moulés										
CD4MCu Grade 1A	J93370		0,04	24,5–26,5	4,75–6,0	1,75–2,25	–	1,00	2,75–3,25	–
CD4MCuN Grade 1B	J93372		0,04	24,5–26,5	4,7–6,0	1,7–2,3	0,10–0,25	1,00	2,7–3,3	–
CD3MCuN Grade 1C	J93373		0,03	24,0–26,7	5,6–6,7	2,9–3,8	0,22–0,33	1,20	1,4–1,9	–
CE8MN Grade 2A	J93345		0,08	22,5–25,5	8,0–11,0	3,0–4,5	0,10–0,30	1,00	–	–
CD6MN Grade 3A	J93371		0,06	24,0–27,0	4,0–6,0	1,75–2,5	0,15–0,25	1,00	–	–
CD3MN Cast 2205 Grade 4A	J92205		0,03	21,0–23,5	4,5–6,5	2,5–3,5	0,10–0,30	1,50	–	–
CE3MN Cast 2507 Grade 5A	J93404	1.4463	0,03	24,0–26,0	6,0–8,0	4,0–5,0	0,10–0,30	1,50	–	–
CD3MWCuN Grade 6A	J93380		0,03	24,0–26,0	6,5–8,5	3,0–4,0	0,20–0,30	1,00	0,5–1,0	0,5–1,0
Aciers austénitiques moulés										
CF3 (cast 304L)	J92500	1.4306	0,03	17,0–21,0	8,0–12,0	–	–	1,50	–	–
CF3M (cast 316L)	J92800	1.4404	0,03	17,0–21,0	9,0–13,0	2,0–3,0	–	1,50	–	–

* valeurs maximales, sauf si l'indication porte sur une plage de valeurs.

– Non spécifié dans les normes.

** Cette nuance était produite à l'origine sans addition d'azote ; considéré par conséquent comme un duplex de première génération.

3 Composition chimique et rôle des éléments d'alliage

3.1 Composition chimique

Il est généralement admis que les propriétés favorables des aciers inoxydables duplex peuvent être obtenues pour des équilibres ferrite-austénite correspondant à des teneurs en ferrite comprises entre 30 et 70 %. On considère toutefois de manière plus générale que les quantités de ferrite et d'austénite sont grossièrement identiques, la production commerciale courante favorisant légèrement l'austénite pour une ténacité et des caractéristiques de transformation optimales. Les interactions entre les principaux éléments d'alliage, en particulier le chrome, le molybdène, l'azote et le nickel sont relativement complexes. Pour obtenir une structure duplex stable, avec un comportement satisfaisant lors des transformations successives de l'acier, il importe que chacun de ces éléments soit présent à un niveau correct.

La composition chimique des aciers duplex doit permettre l'équilibre des phases tout en évitant un écueil majeur : la formation, aux températures élevées, dans les aciers inoxydables à haute teneur en chrome et molybdène, de phases intermétalliques dommageables – les phases sigma et chi, qui précipitent préférentiellement dans la ferrite. L'addition d'azote en retardant significativement la formation, il est essentiel que l'azote soit présent en quantité suffisante dans la solution solide. A mesure que l'expérience avec les aciers inoxydables duplex progressait, on s'est également aperçu de l'importance de limites de composition chimique étroites. La plage de composition fixée à l'origine pour l'acier duplex 2205 (UNS S31803, Tableau 1) était trop étendue : l'expérience a montré que les niveaux de chrome, de molybdène et d'azote devaient se situer dans la moitié haute de la plage de composition pour assurer une résistance à la corrosion optimale et éviter les phases intermétalliques. Ceci a conduit à l'introduction de l'acier UNS S32205, avec des limites de composition plus resserrées (Tableau 1). L'acier UNS S32205 est aujourd'hui typique de la production commerciale de la nuance 2205. Sauf indication contraire dans le présent document, la nuance 2205 se réfère à l'acier UNS S32205.

3.2 Rôle des éléments d'alliage

Dans ce paragraphe, nous passons brièvement en revue l'effet des principaux éléments d'alliage sur les propriétés mécaniques, physiques et de corrosion des aciers inoxydables duplex.

Chrome : Une teneur minimale d'environ 10,5 % est nécessaire pour former un film passif de chrome qui soit stable, suffisant pour protéger l'acier contre une corrosion atmosphérique modérée. La résistance à la corrosion augmente avec la teneur en chrome. Le chrome est alphasé : il favorise la forme ferritique, c'est-à-dire la structure cubique centrée du fer. Des teneurs en chrome élevées nécessitent des quantités accrues de nickel pour former une structure austénitique ou austéno-ferritique (duplex). Elles favorisent également la formation de phases intermétalliques. Les aciers inoxydables austénitiques contiennent habituellement au moins 16 % de Cr et les nuances duplex au moins 20 %. Le chrome augmente également la résistance à l'oxydation aux températures élevées. Cet effet du chrome est important en raison de son incidence sur la formation – et la suppression – de la calamine et des colorations thermiques résultant du traitement thermique ou du soudage. Les aciers inoxydables duplex sont plus difficilement attaquables à l'acide et la suppression de la coloration thermique est plus difficile que dans le cas des aciers austénitiques.

Molybdène : Le molybdène renforce l'action du chrome en conférant à l'acier inoxydable une résistance à la corrosion par piqûres. Pour une teneur en chrome d'au moins 18 %, les additions de molybdène sont environ trois fois plus efficaces que les additions de chrome lorsqu'il s'agit de protéger l'acier de la corrosion par piqûres et de la corrosion cavernueuse en milieu chloruré. Le molybdène est alphasé. Il augmente la tendance des aciers inoxydables à former des phases intermétalliques nocives. C'est pourquoi on limite habituellement sa teneur à environ 7,5 % dans les aciers austénitiques et à 4 % dans les aciers duplex.

Azote : L'azote augmente la résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion cavernueuse des aciers inoxydables austénitiques et duplex. Il augmente également notablement leur résistance mécanique. De fait, il constitue l'élément le plus efficace pour durcir la solution solide et ce, à faible coût. La ténacité améliorée des aciers duplex à l'azote est due à leur teneur accrue en austénite et à la réduction des phases intermétalliques. L'azote n'empêche pas la précipitation de ces phases mais en retarde suffisamment la formation pour permettre le travail des nuances duplex. Il est ajouté aux aciers inoxydables austénitiques et duplex fortement résistants à la corrosion, avec des teneurs élevées en chrome et en molybdène, afin de compenser leur propension à former une phase sigma.

L'azote est un gammagène puissant (il favorise la forme austénitique) et peut remplacer une partie du nickel dans les aciers inoxydables austénitiques. Il réduit l'énergie de défaut d'empilement et augmente le taux d'écroissage de l'austénite. Il augmente également la résistance de l'austénite par durcissement de la solution solide. Il est usuel d'ajouter de l'azote aux aciers duplex et d'ajuster la quantité de nickel afin de réaliser l'équilibre des phases souhaité. Les éléments alphas, le chrome et le molybdène, sont équilibrés par les éléments gammagènes, le nickel et l'azote, avec formation de la structure duplex.

Nickel : Le nickel est un élément stabilisateur de l'austénite ; il favorise le passage de la structure cubique centrée (ferritique) de l'acier inoxydable à la structure cubique faces centrées (austénitique). Les

aciers inoxydables ferritiques contiennent peu ou pas de nickel, les aciers duplex ont une teneur faible ou moyenne – 1,5 % à 7 % –, et les aciers austénitiques de la série AISI 300 en contiennent au moins 6 % (voir les Figures 1, 2). L'addition de nickel retarde la formation des phases intermétalliques néfastes dans les aciers austénitiques mais est beaucoup moins efficace que l'azote dans sa capacité à retarder leur formation dans les aciers duplex. La structure cubique faces centrées explique l'excellente ténacité des aciers austénitiques. Sa présence dans près de la moitié de la microstructure des nuances duplex augmente considérablement la ténacité de ces derniers par rapport aux aciers ferritiques.

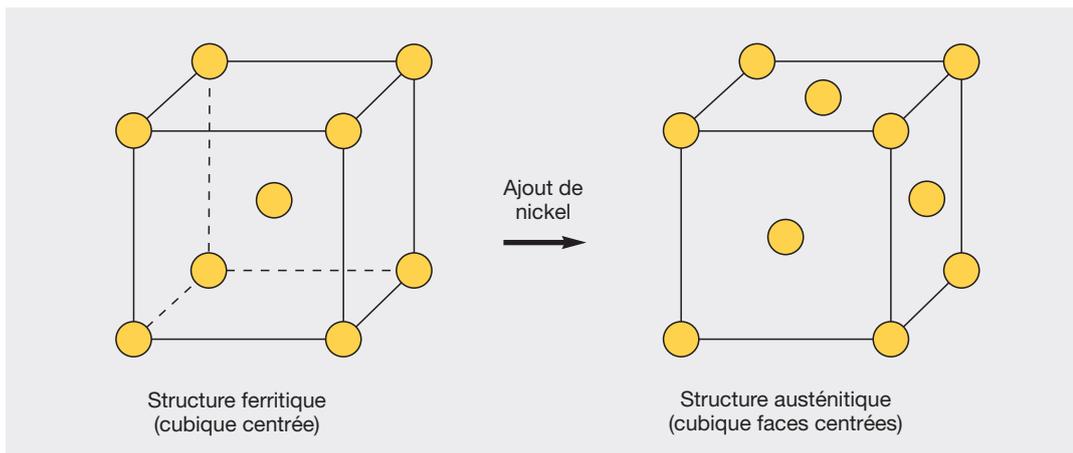


Figure 1 : L'ajout de nickel fait passer de la structure cubique centrée (peu ou pas de nickel) à la structure cubique faces centrées (au moins 6 % de nickel – série AISI 300). Les aciers inoxydables duplex, avec leur teneur en nickel intermédiaire, ont une microstructure dans laquelle certains grains sont ferritiques et certains sont austénitiques, théoriquement à peu près en quantités égales (Figure 2).

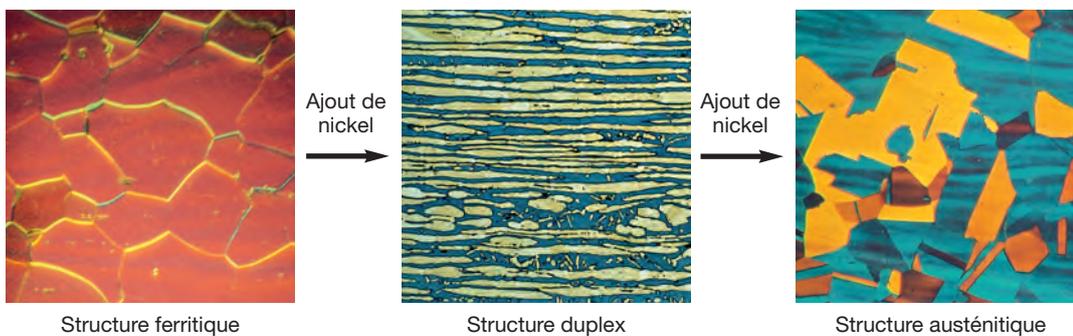


Figure 2 : L'augmentation de la teneur en nickel modifie la microstructure d'un acier inoxydable de ferritique (gauche) à duplex (centre) puis austénitique (droite) (ces images, aimablement communiquées par Outokumpu, montrent des échantillons polis puis attaqués à l'acide, agrandis au microscope optique. Dans la structure duplex, la ferrite a été colorée de manière à faire apparaître comme la phase la plus foncée).

4 Métallurgie des aciers inoxydables duplex

Le diagramme de phase ternaire fer-chrome-nickel illustre le comportement métallurgique des aciers inoxydables duplex. Une coupe du diagramme ternaire à 68 % de fer (Figure 3) montre que ces alliages se solidifient sous forme de ferrite (α), dont une partie, en fonction de la composition de l'alliage, se transforme ensuite en austénite (γ) lorsque la température s'abaisse à environ 1000 °C (1832 °F). Aux températures inférieures, l'équilibre ferrite-austénite connaît peu de modifications supplémentaires. L'effet de l'augmentation de la teneur en azote apparaît également sur la Figure 3 (Réf. 1). Thermodynamiquement, l'austénite se formant à partir de la ferrite, le niveau d'équilibre de l'austénite ne peut être dépassé. Mais, à mesure que le refroidissement progresse et que les températures s'abaissent, les carbures, nitrides, phase sigma et autres phases intermétalliques sont autant de constituants microstructuraux susceptibles d'apparaître.

Les quantités relatives de ferrite et d'austénite présentes dans le produit sidérurgique ou le produit transformé dépendent de la composition et de l'historique des températures de l'acier. Comme l'indique le diagramme des phases, de petites variations dans la composition de l'alliage peuvent avoir un effet important sur la fraction volumique relative des deux phases en équilibre. Les tendances des différents éléments d'alliage à favoriser la formation d'austénite ou de ferrite se retrouvent assez bien dans le cas des nuances duplex. L'équilibre des phases ferrite/austénite dans

la microstructure peut être prédit au moyen d'une régression linéaire multivariée comme suit :

$$Cr_{eq} = \% Cr + 1,73 \% Si + 0,88 \% Mo$$

$$Ni_{eq} = \% Ni + 24,55 \% C + 21,75 \% N + 0,4 \% Cu$$

$$\% \text{ ferrite} = -20,93 + 4,01 Cr_{eq} - 5,6 Ni_{eq} + 0,016 T$$

où T (en degrés Celsius) est la température de recuit, comprise entre 1050 °C et 1150 °C, et les compositions élémentaires sont exprimées en % massiques (Réf. 2). Le maintien d'un équilibre des phases donné, pour un acier duplex, est atteint principalement en ajustant les teneurs en chrome, en molybdène, en nickel et en azote, et enfin, en contrôlant l'historique thermique. La vitesse de refroidissement déterminant la quantité de ferrite qui peut se transformer en austénite, l'équilibre des phases dépend toutefois des vitesses de refroidissement qui suivent une exposition à des températures élevées. Un refroidissement rapide favorise la présence de ferrite, dont la teneur ne correspond alors plus à l'équilibre. Le soudage d'un profilé lourd avec un faible apport de chaleur, par exemple, peut entraîner un excès de ferrite dans la ZAT.

Un autre effet bénéfique de l'azote, mis en évidence sur la Figure 3, est le relèvement de la température à partir de laquelle il y a transformation de la ferrite en austénite. Ceci conduit à une accélération de la transformation de sorte que, même dans le cas de vitesses de refroidissement relativement élevées, l'austénite peut pratiquement atteindre le niveau d'équilibre. Dans les aciers inoxydables duplex de la seconde génération, cet effet réduit le problème d'excès de ferrite dans la ZAT.

Lors du refroidissement, la phase sigma précipite à des températures inférieures à celles correspondant à la transformation de ferrite en austénite (Figure 4). Pour éviter cette phase sigma, il faut par conséquent maîtriser la température de recuit et veiller à ce que la trempe suive dans les meilleurs délais. La vitesse de refroidissement nécessaire étant relativement élevée, ceci autorise la trempe à l'eau. Dans la pratique, des vitesses de refroidissement excessives risquent de se produire uniquement lors du soudage d'éléments de sections très différentes ou lors du soudage de profilés lourds, lorsque l'apport de chaleur est faible.

La phase alpha prime constitue également une phase stable dans les alliages duplex, qui apparaît dans la phase ferritique au-dessous d'environ 525 °C (950 °F), à la manière de ce qui se passe dans les alliages purement ferritiques. Après une exposition prolongée à des températures situées autour de 475 °C (885 °F), les aciers ferritiques connaissent une perte de ténacité à température ambiante liée à la présence de la phase alpha prime. Ce phénomène est connu sous le nom de fragilisation à 475 °C (885 °F).

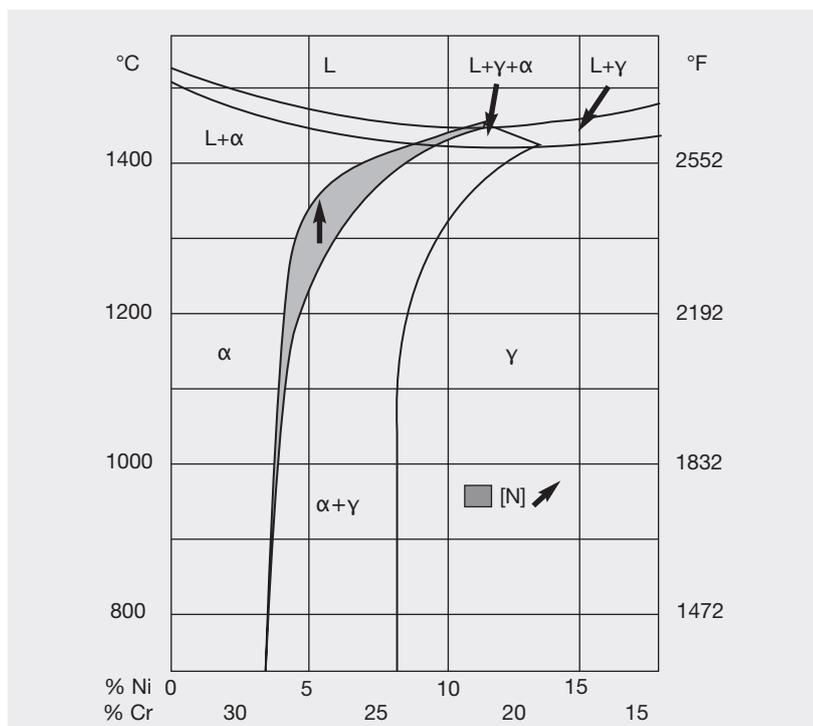


Figure 3 : Coupe du diagramme ternaire Fe-Cr-Ni pour 68 % de fer. De petites variations de la teneur en nickel et en chrome ont une incidence importante sur les quantités d'austénite et de ferrite dans les aciers duplex

L'utilisation de l'azote comme élément d'alliage entraîne la possibilité d'une présence de nitrures de chrome aux joints des grains (ferrite-ferrite ou austénite-ferrite) dans la zone affectée thermiquement par le soudage. Si ces nitrures sont formés en fractions volumiques importantes et dans des conditions telles que les zones déchromées n'ont pas le temps de s'homogénéiser pendant le recuit, ils peuvent affecter négativement la résistance à la corrosion. Cependant, une teneur élevée en azote favorisant la présence d'austénite, et l'austénite ayant une forte affinité pour l'azote, les aciers inoxydables duplex de seconde génération contiennent rarement des quantités significatives de nitrures de chrome. En outre, ces aciers de seconde génération sont produits avec des teneurs en carbone très faibles, de sorte que la formation de carbures à un niveau préjudiciable ne constitue habituellement pas un réel souci.

La phase sigma, la phase alpha prime, les carbures et les nitrures, tous dommageables, peuvent apparaître en l'espace de quelques minutes à certaines températures. Les traitements thermiques appliqués au cours de la transformation et du travail des aciers, tout comme les cycles thermiques auxquels ceux-ci sont ensuite soumis en service, doivent par conséquent tenir compte de la cinétique des réactions correspondantes afin de garantir que la résistance à la corrosion et les propriétés mécaniques désirées seront bien obtenues. Les nuances duplex ont été développées afin de maximiser la résistance à la corrosion et de retarder suffisamment les réactions de précipitation de manière à garantir le bon déroulement de la fabrication et obtenir des pièces de qualité.

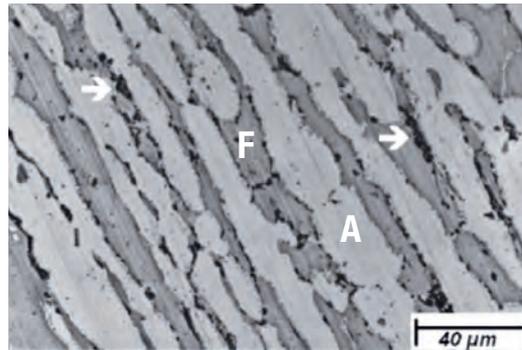


Figure 4 : Microstructure d'une éprouvette d'acier EN 1.4462 (2205) vieillie à 850 °C (1560 °F) pendant 40 minutes, montrant la précipitation de la phase sigma (flèches) sur les joints austénite/ferrite. Sur la micrographie, la phase ferrite (F) apparaît plus foncée que la phase austénite (A) (Réf. 3).

La Figure 5 montre les diagrammes de précipitation isotherme (diagrammes TTT) pour les aciers inoxydables duplex EN 1.4362 (2304), EN 1.4462 (2205) et EN 1.4410 (2507 ; réf. 4, 5, 6, 7). Le début de la précipitation des carbures et des nitrures de chrome démarre relativement lentement, après 1 à 2 minutes de maintien en température. Ce démarrage est plus lent que dans les nuances ferritiques ou les nuances austénitiques fortement alliées, et est dû, en partie, à la solubilité élevée du carbone et de l'azote dans la phase d'austénite à faible teneur en nickel, et peut-être à un effet de retardement de l'azote sur la précipitation des carbures. En conséquence, les nuances duplex sont relativement résistantes à la sensibilisation lors du refroidissement. Les cinétiques de formation des carbures et des nitrures ne sont affectées

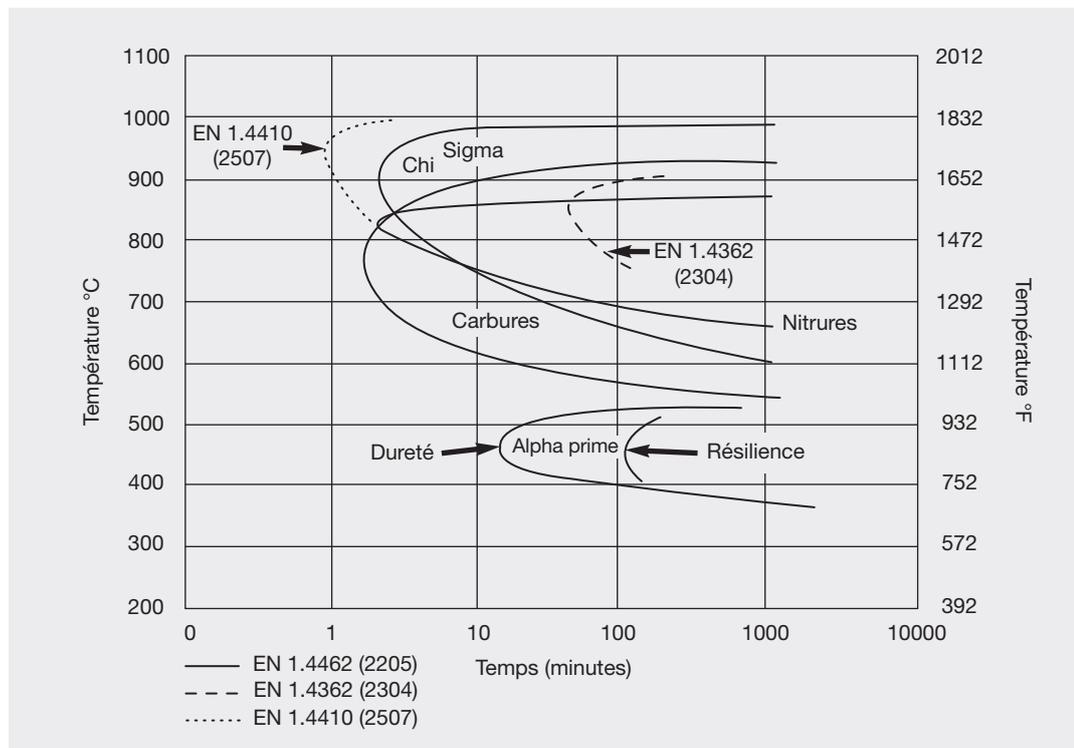


Figure 5 : Diagramme de précipitation isotherme (TTT) pour l'acier duplex EN 1.4462 (2205), recuit à 1050 °C (1920 °F). (Les nuances duplex EN 1.4362 (2304) et EN 1.4410 (2507) sont indiquées à titre de comparaison)



Raccords de tuyauterie en acier duplex EN 1.4410 (2507)
(Source : Swagelok)

que marginalement par le chrome, le molybdène et le nickel, de sorte que tous les aciers duplex alliés à l'azote présentent, pour ces précipités, des cinétiques semblables à celles de l'acier EN 1.4462 (2205). La précipitation des phases sigma et chi se produit à des températures légèrement plus élevées mais approximativement dans le même temps que la précipitation des carbures et des nitrures. Les nuances duplex qui sont plus fortement alliées en chrome, molybdène et nickel auront une cinétique de précipitation des phases sigma et chi plus rapide que l'acier EN 1.4462 (2205) ; celles avec une teneur en éléments d'alliage inférieure auront une cinétique plus lente. Ceci est illustré par les courbes tirées de la Figure 5 montrant un début plus précoce de formation des phases sigma et chi pour l'acier EN 1.4410 (2507), plus fortement allié, et un début plus lent pour l'acier EN 1.4362 (2304).

La phase alpha prime précipite à l'intérieur de la phase ferritique et a pour effet de durcir et de fragiliser la ferrite. Heureusement, les aciers inoxydables duplex contenant 50 % d'austénite, ces effets ne sont pas tout à fait aussi préjudiciables que dans les aciers entièrement ferritiques. La perte de résilience (fragilisation) due à la précipitation d'alpha prime est plus lente que le durcissement (Figure 5). La fragilisation par la phase alpha prime constitue rarement un souci lors du travail des aciers duplex, compte tenu du délai important nécessaire pour qu'elle se produise. Néanmoins, la formation de la phase alpha prime commande la limite supérieure de température en service.

Une exposition à long terme à des températures élevées peut entraîner une perte de ténacité à température ambiante. Les codes de conception des récipients sous pression ont par conséquent assujéti la validité des contraintes maximales admissibles à des limites supérieures de la température. Le code allemand TÜV fait la distinction entre les constructions soudées et les constructions non soudées. Il est plus conservateur, dans ses limites supérieures de température, que le code ASME correspondant. Les limites de température indiquées par ces codes sont récapitulées dans le **Tableau 2** pour différents aciers duplex.

Le **Tableau 3**, quant à lui, récapitule un certain nombre de réactions de précipitation et de limites de température importantes pour les aciers duplex.

Tableau 2 : Limites supérieures de température des aciers duplex pour les contraintes maximales admissibles, telles qu'indiquées dans les codes de calcul des récipients sous pression

Nuance	Etat	ASME		TÜV	
		°C	°F	°C	°F
EN 1.4362 (2304)	Non soudé	315	600	300	570
EN 1.4362 (2304)	Soudé, métal d'apport assorti	315	600	300	570
EN 1.4362 (2304)	Soudé avec 2205/2209	315	600	250	480
EN 1.4462 (2205)	Non soudé	315	600	280	535
EN 1.4462 (2205)	Soudé	315	600	250	480
EN 1.4410 (2507)	Tubes sans soudure	315	600	250	480
Alliage 255	Soudé ou non soudé	315	600		

Tableau 3 : Températures typiques des réactions de précipitation et autres réactions caractéristiques des aciers inoxydables duplex

	EN 1.4462 (2205)		EN 1.4410 (2507)	
	°C	°F	°C	°F
Plage de solidification	1470 à 1380	2680 à 2515	1450 à 1350	2640 à 2460
Température de formation de calamine (à l'air)	1000	1830	1000	1830
Formation de phase sigma	700 à 950	1300 à 1740	700 à 1000	1300 à 1830
Précipitation de carbures	450 à 800	840 à 1470	450 à 800	840 à 1470
Fragilisation à 475 °C/885 °F	300 à 525	575 à 980	300 à 525	575 à 980

5 Résistance à la corrosion

Les aciers inoxydables duplex présentent un niveau élevé de résistance à la corrosion dans la plupart des environnements où il est d'usage d'employer des nuances austénitiques standard. Mais il est aussi quelques cas notables où les aciers duplex sont incontestablement supérieurs. Ceci tient à leur teneur élevée en chrome, bénéfique dans les acides oxydants, et à une teneur en molybdène et en nickel suffisante pour conférer une résistance dans les milieux acides modérément réducteurs. Les teneurs relativement élevées en chrome, molybdène et azote leur assurent également une très bonne résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion caverneuse en milieu chloruré. Leur structure duplex constitue un avantage dans les milieux chlorurés avec corrosion sous contrainte potentielle : contenant vingt-cinq à trente pour cent minimum de ferrite, les aciers duplex sont bien plus résistants que les aciers austénitiques EN 1.4301 (AISI 304) ou EN 1.4401 (AISI 316). La ferrite est toutefois sensible à la fragilisation par l'hydrogène de sorte que les aciers duplex ne présentent pas une tenue à la corrosion élevée dans des environnements ou des applications où une pénétration d'hydrogène dans le métal est à craindre.

5.1 Résistance aux acides

La Figure 6 illustre la résistance à la corrosion des aciers inoxydables duplex dans les acides forts : elle fournit des données pour des solutions d'acide sulfurique allant des faibles concentrations, modérément réductrices, aux concentrations élevées, oxydantes, en passant par une gamme de concentrations intermédiaires fortement réductrices lorsque les solutions sont chaudes à très chaudes. Les aciers duplex EN 1.4462 (2205) et EN 1.4410 (2507) surpassent l'un comme l'autre beaucoup d'aciers austénitiques à teneur élevée en nickel dans des solutions contenant jusqu'à environ 15 % d'acide. Ils sont meilleurs que les aciers EN 1.4401 (AISI 316) ou AISI 317 jusqu'à au moins 40 % d'acide. Les nuances duplex peuvent également être très utiles dans des acides oxydants de ce type en présence de chlorures. Par contre, elles ne contiennent pas suffisamment de nickel pour résister aux conditions fortement réductrices correspondant à l'acide chlorhydrique ou aux solutions d'acide sulfurique de concentration moyenne. Aux interfaces humide/sec dans les environnements réducteurs avec concentration d'acide, la corrosion,

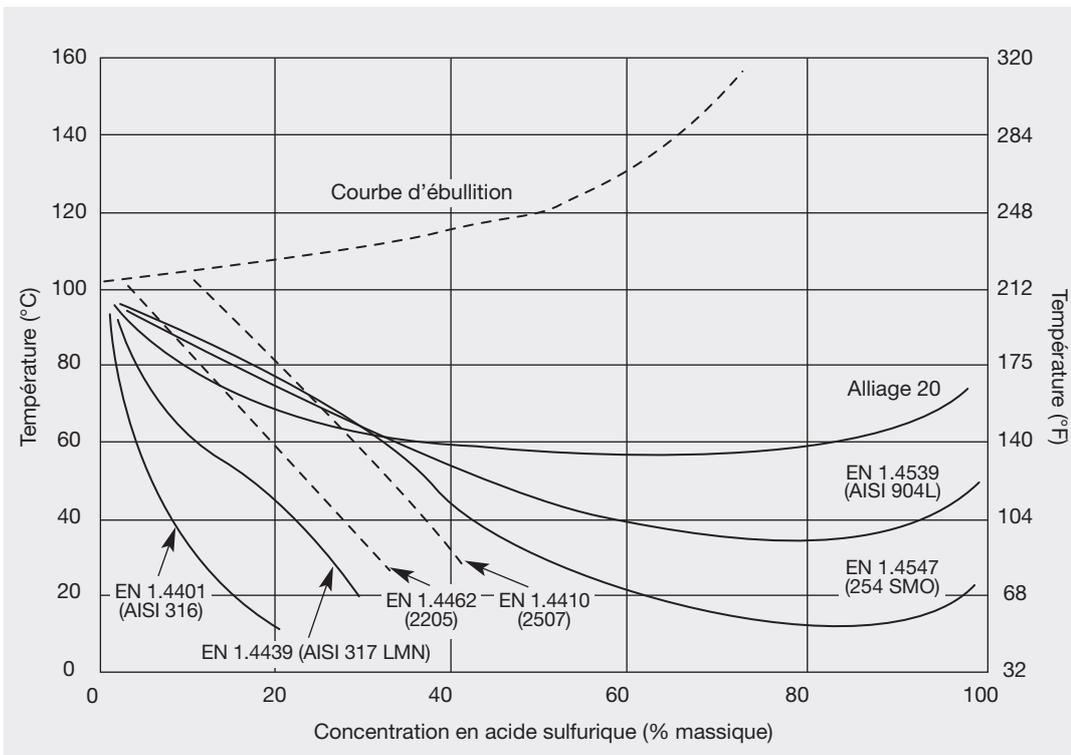


Figure 6 : Corrosion dans l'acide sulfurique désaéré : diagramme d'isocorrosion – 0,1 mm/an (0,004 in/an) – obtenu en laboratoire avec de l'acide sulfurique qualité « réactif ». (Source : fiches techniques producteur ; 254 SMO est une marque déposée d'Outokumpu)

particulièrement de la ferrite, peut apparaître et progresser rapidement. Leur résistance aux conditions oxydantes fait des aciers duplex de bons candidats à l'emploi en présence d'acide nitrique et des acides organiques forts. Ceci est illustré par la Figure 7 pour des solutions contenant 50 % d'acide acétique et différentes proportions d'acide formique, à leur température d'ébullition. Les aciers EN 1.4301 (AISI 304) et EN 1.4401 (AISI 316) supporteront ces acides organiques forts aux températures ambiantes et modérées, mais l'acier EN 1.4462 (2205) et d'autres nuances duplex seront plus performants dans bon nombre de procédés impliquant des acides organiques à haute température. En raison de leur résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion sous contrainte, les aciers duplex sont également employés dans les procédés impliquant des hydrocarbures halogénés.

5.2 Résistance aux bases

La teneur élevée en chrome et la présence de ferrite assurent une bonne performance des aciers inoxydables duplex dans les environnements basiques. Aux températures modérées, les vitesses de corrosion sont inférieures à celles des nuances austénitiques standard.

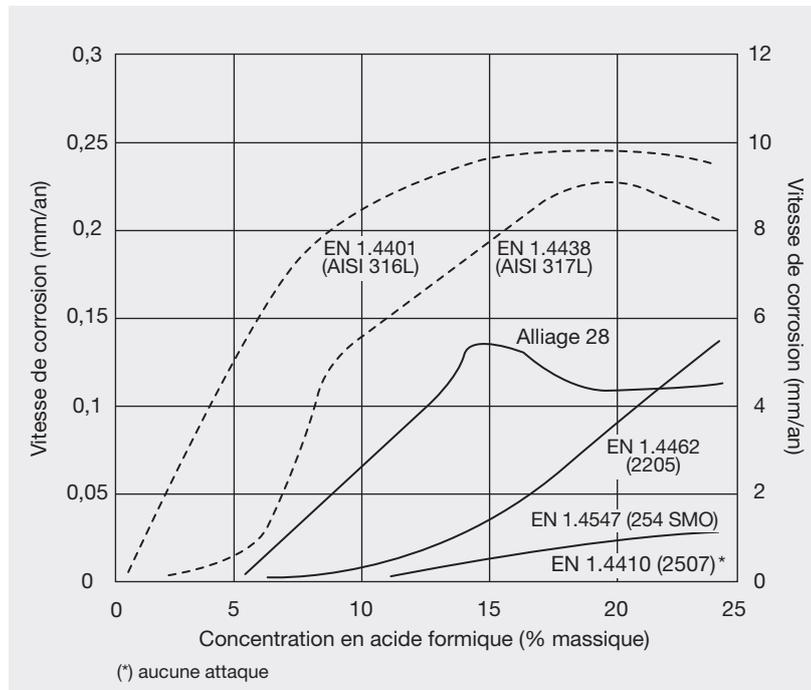


Figure 7 : Corrosion des aciers duplex et austénitiques dans des mélanges en ébullition d'acide acétique à 50 % et de proportions variables d'acide formique (Source : Sandvik)

- 1 ASTM G 150 standard test method for electrochemical critical pitting temperature testing of stainless steels
- 2 ASTM G 48 standard test method for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by ferric chloride solution

5.3 Résistance à la corrosion par piqûres et résistance à la corrosion caverneuse

Lorsqu'on aborde la résistance à la corrosion par piqûres des aciers inoxydables, il est utile d'introduire le concept de température critique de piqûration. Pour un milieu chloruré donné, chaque acier inoxydable peut être caractérisé par une température à partir de laquelle la corrosion par piqûres s'amorce et se propage jusqu'à devenir détectable à l'œil nu dans un délai d'environ 24 heures. Au-dessous de cette température, la corrosion par piqûres ne s'amorcera pas avant un temps infiniment long. Cette température est connue sous le nom de température critique de piqûration (CPT). Elle constitue une caractéristique de la nuance d'acier inoxydable et du milieu considéré. L'amorçage de la corrosion par piqûres étant aléatoire et la CPT étant sensible aux variations mineures à l'intérieur des nuances ou des produits, on l'exprime généralement sous forme d'une plage de valeurs. La méthode décrite dans l'ASTM G 150¹ permet toutefois de déterminer cette température avec précision et de manière fiable au moyen de mesures électrochimiques.

Il existe une température critique similaire pour la corrosion caverneuse, appelée température critique de corrosion caverneuse (CCT). La CCT dépend de l'acier inoxydable et du milieu chloruré considérés ainsi que des caractéristiques (largeur, longueur, etc.) de la caverne. La CCT dépendant de la géométrie de la caverne et la reproductibilité de ces dernières étant difficile à réaliser dans la pratique, la dispersion de la CCT est plus importante que celle de la CPT. Typiquement, pour le même acier et le même environnement de corrosion, la CCT sera inférieure de 15–20 °C (27–36 °F) à la CPT.

Les teneurs élevées en chrome, molybdène et azote des nuances duplex assurent une très bonne résistance à la corrosion localisée induite par les chlorures en milieu aqueux. Selon les valeurs de ces teneurs, certaines nuances duplex sont parmi les aciers inoxydables les plus performants. Leurs teneurs en chrome relativement élevées leur confèrent un niveau élevé de résistance à la corrosion d'une manière particulièrement économique. La Figure 8 présente une comparaison des résistances à la corrosion par piqûres et à la corrosion caverneuse de différents aciers inoxydables après recuit de mise en solution. Les résistances à la corrosion ont été mesurées selon le mode opératoire ASTM G 48², avec une solution à 6 % de chlorure ferrique. Les températures critiques des matériaux bruts de soudage devraient être légèrement inférieures. Des températures critiques de piqûration ou de corrosion caverneuse plus élevées indiquent une meilleure résistance à l'amorçage de ces formes de corrosion. On observe que la CPT et

la CCT de l'acier EN 1.4462 (2205) sont nettement supérieures à celles de l'acier EN 1.4401 (AISI 316), ce qui fait du EN 1.4462 (2205) un matériau polyvalent idéal pour des applications où des chlorures sont concentrés par évaporation, comme dans la partie vapeur des échangeurs de chaleur ou sous un calorifugeage. La CPT de l'acier EN 1.4462 (2205) annonce un bon comportement dans de nombreuses eaux saumâtres et saumures désaérées. Cet acier duplex a été employé avec succès dans des applications en eau de mer désaérée où la surface était maintenue exempte de dépôts grâce à des débits élevés ou par d'autres moyens. La résistance à la corrosion cavernueuse de l'acier duplex EN 1.4462 (2205) n'est pas suffisante pour résister à l'eau de mer dans des applications critiques telles que les tubulures d'échangeurs de chaleur à parois minces, ou en présence de dépôts ou de cavernes existantes. Par contre, les aciers duplex plus fortement alliés, avec une CCT supérieure à celle de l'acier EN 1.4462 (2205) – superduplex, par exemple – ont été employés dans de nombreuses situations critiques au contact de l'eau de mer, nécessitant à la fois résistance mécanique et résistance aux chlorures.

La CPT dépend du matériau et du milieu. Une analyse statistique par régression a été appliquée aux compositions des aciers (chaque élément d'alliage étant considéré comme une variable indépendante) et à la CPT mesurée (la variable dépendante) selon la méthode A de l'ASTM G 48. Il en est ressorti que seul le chrome, le molybdène, le tungstène et l'azote ont un effet mesurable cohérent sur la CPT, conformément à la relation :

$$CPT = \text{constante} + \% \text{ Cr} + 3,3 (\% \text{ Mo} + 0,5 \% \text{ W}) + 16 \% \text{ N}.$$

Dans cette relation, la somme des quatre variables que constituent les teneurs en éléments d'alliage

multipliées par leurs coefficients de régression est communément appelée indice de résistance à la corrosion par piqûres (PREN - Pitting Resistance Equivalent Number). Le coefficient pour l'azote varie selon les chercheurs et les valeurs couramment utilisées sont 16, 22 et 30 (Réf. 8). Le PREN est utile pour classer des nuances au sein d'une même famille d'aciers. Il faut cependant veiller à ne pas lui accorder une confiance excessive et inadaptée. Les variables « indépendantes » (éléments d'alliage) ne sont pas vraiment indépendantes, les aciers considérés étant des compositions à l'équilibre. Les relations ne sont pas linéaires, et les interdépendances, telles que les synergies du chrome et du molybdène, ont été ignorées. La relation suppose une transformation idéale du matériau, mais ne tient pas compte de l'effet des phases intermétalliques, des précipités non métalliques ou des traitements thermiques inappropriés susceptibles d'affecter négativement la résistance à la corrosion.

5.4 Résistance à la corrosion fissurante sous contrainte

Certains des tout premiers usages des aciers inoxydables duplex étaient fondés sur leur résistance à la corrosion sous contrainte (CSC) en milieu chloruré. Comparés aux aciers inoxydables austénitiques avec une résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion cavernueuse en milieu chloruré similaire, les aciers duplex présentent une résistance à la CSC significativement meilleure. Dans les industries chimiques, ils sont fréquemment employés en remplacement de nuances austénitiques dans des applications présentant un risque significatif de CSC. Mais, comme c'est le cas pour de nombreux matériaux, les aciers inoxydables duplex sont néanmoins susceptibles de corrosion sous contrainte dans certaines conditions.

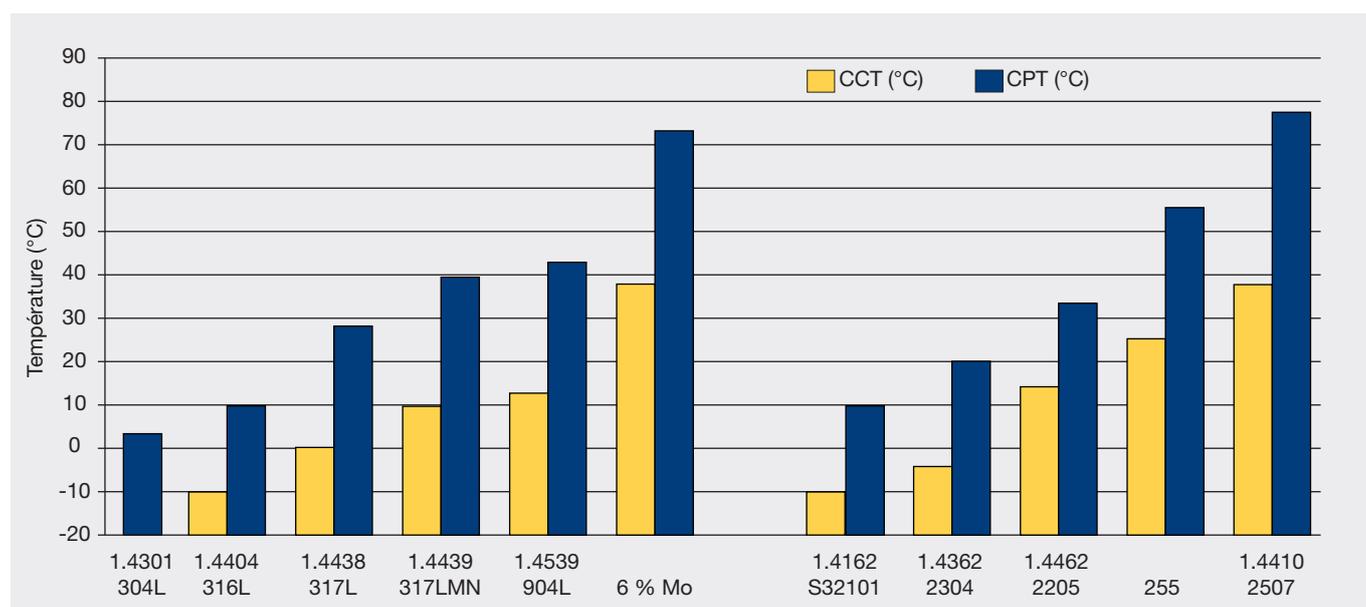


Figure 8 : Températures critiques de piqûration (CPT) et de corrosion cavernueuse (CCT) des aciers austénitiques (à gauche) et des aciers duplex (à droite) non soudés, après recuit de mise en solution (détermination conformément à ASTM G 48 dans une solution à 6 % de chlorure ferrique)

Ceci peut se produire dans des milieux chlorurés à haute température ou dans des conditions favorables à une fissuration par l'hydrogène. Les environnements dans lesquels les aciers duplex sont susceptibles de corrosion sous contrainte sont ceux, par exemple, de l'essai avec une solution de chlorure de magnésium à 42 % en ébullition, ceux de l'essai d'évaporation goutte à goutte lorsque la température du métal est élevée ainsi que les solutions aqueuses de chlorures sous pression à des températures supérieures à ce qui est possible à pression ambiante.

La résistance relative à la corrosion sous contrainte en milieu chloruré agressif est illustrée par la Figure 9 pour un certain nombre d'aciers inoxydables duplex et austénitiques à l'état recuit (Réf. 9). L'essai d'évaporation goutte à goutte employé pour produire ces données est très agressif parce qu'il est conduit à une température élevée – 120 °C (248 °F) – et que la solution de chlorures est concentrée par évaporation. Dans cet essai, les deux aciers duplex montrés, EN 1.4462 (2205) et EN 1.4410 (2507), finiront par se fissurer à une certaine fraction de leur limite d'élasticité, mais cette fraction est beaucoup plus élevée que celle des aciers inoxydables du type EN 1.4401 (AISI 316). En raison de leur résistance à la CSC en milieux aqueux chlorurés à la pression ambiante – corrosion sous isolation, par exemple –, l'emploi des aciers duplex est envisageable dans les milieux chlorurés dans lesquels les aciers EN 1.4301 (AISI 304) et EN 1.4401 (AISI 316) sont connus pour



Tubes en acier inoxydable duplex (Source : Butting)

subir une corrosion fissurante. Le Tableau 4 récapitule le comportement de corrosion sous contrainte en présence de chlorures pour différents aciers inoxydables et différents milieux d'essai correspondant à différents degrés d'agressivité. Les milieux dans la partie gauche du tableau sont agressifs en raison de leurs sels acides tandis que ceux de la partie droite sont agressifs en raison des températures élevées. Les milieux au centre sont moins agressifs. Les aciers inoxydables austénitiques standard, à moins de 4 % Mo, subissent une corrosion sous contrainte en présence de chlorures dans tous ces milieux, tandis que les aciers duplex sont résistants dans toute la gamme médiane correspondant aux conditions d'essai modérées.

La résistance à la corrosion sous contrainte induite par l'hydrogène est une fonction complexe, non seulement de la teneur en ferrite mais également de la résistance mécanique, de la température, des conditions d'absorption de l'hydrogène et de la contrainte appliquée. En dépit de leur susceptibilité à la fissuration par l'hydrogène, les aciers duplex sont néanmoins employés dans des milieux contenant de l'hydrogène du fait de leurs avantages en termes de résistance mécanique, sous réserve toutefois d'une évaluation et d'un contrôle des conditions de fonctionnement. Les tubulures à haute résistance dans lesquelles circulent des mélanges de gaz légèrement acides et de saumure constituent la plus notable de ces applications. La Figure 10 montre les conditions d'immunité et de susceptibilité à la corrosion de l'acier EN 1.4462 (2205) dans les environnements acides contenant du chlorure de sodium (Réf. 10).

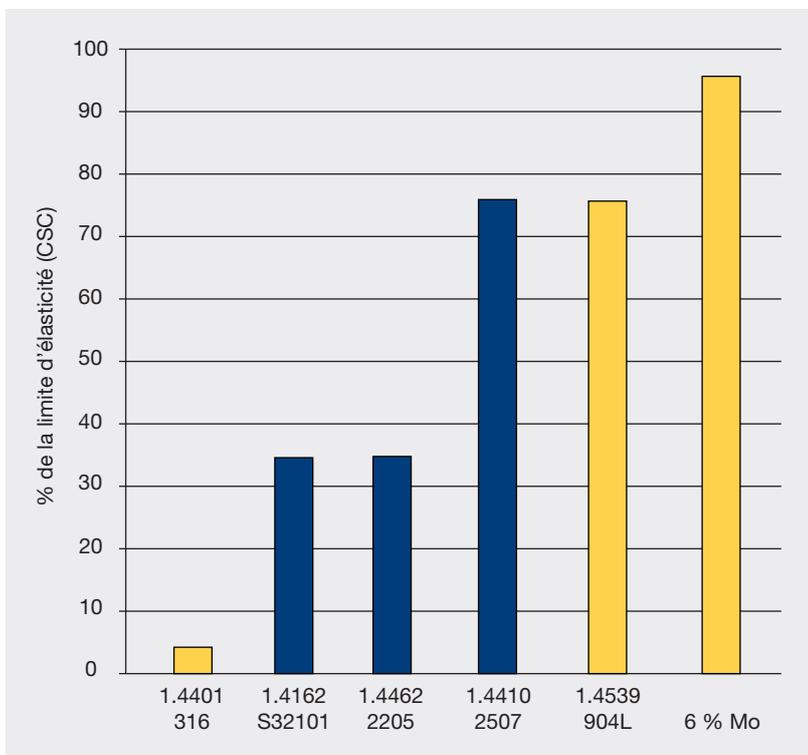


Figure 9 : Résistance à la corrosion sous contrainte des aciers inoxydables austénitiques et duplex à l'état recuit, déterminée par l'essai d'évaporation goutte à goutte avec des solutions de chlorure de sodium à 120 °C (248 °F) (la contrainte ayant causé la fissuration est indiquée sous forme d'un pourcentage de la limite d'élasticité) (Source : Outokumpu)

Tableau 4 : Résistance à la corrosion fissurante sous contrainte : comparaison des aciers inoxydables duplex et austénitiques non soudés soumis à des essais accélérés en laboratoire (Source : diverses sources bibliographiques)

Nuance	EN 1.4307 (AISI 304L) EN 1.4404 (AISI 316L)	3RE60	EN 1.4162 (S32101) EN 1.4062 (S32202)	EN 1.4462 (2205)	25 % Cr Duplex	Superduplex
42 % MgCl ₂ ébullition 154 °C éprouvette en U						
35 % MgCl ₂ ébullition 125 °C éprouvette en U						
Evap. goutte à goutte NaCl 0,1M 120 °C 0,9 x limite d'élast.						
Essai à la mèche 1500 ppm Cl sous forme NaCl 100 °C						
33 % LiCl ₂ ébullition 120 °C éprouvette en U						
40 % CaCl ₂ 100 °C 0,9 x limite d'élast.						
25-28 % NaCl ébullition 106 °C éprouvette en U						
26 % NaCl autoclave 155 °C éprouvette en U						
26 % NaCl autoclave 200 °C éprouvette en U						
600 ppm Cl (NaCl) autoclave 300 °C éprouvette en U						
100 ppm Cl (sel de mer + O ₂) autoclave 230 °C éprouvette en U						

■ Fissuration attendue ■ Fissuration possible ■ Fissuration imprévue ■ Données insuffisantes

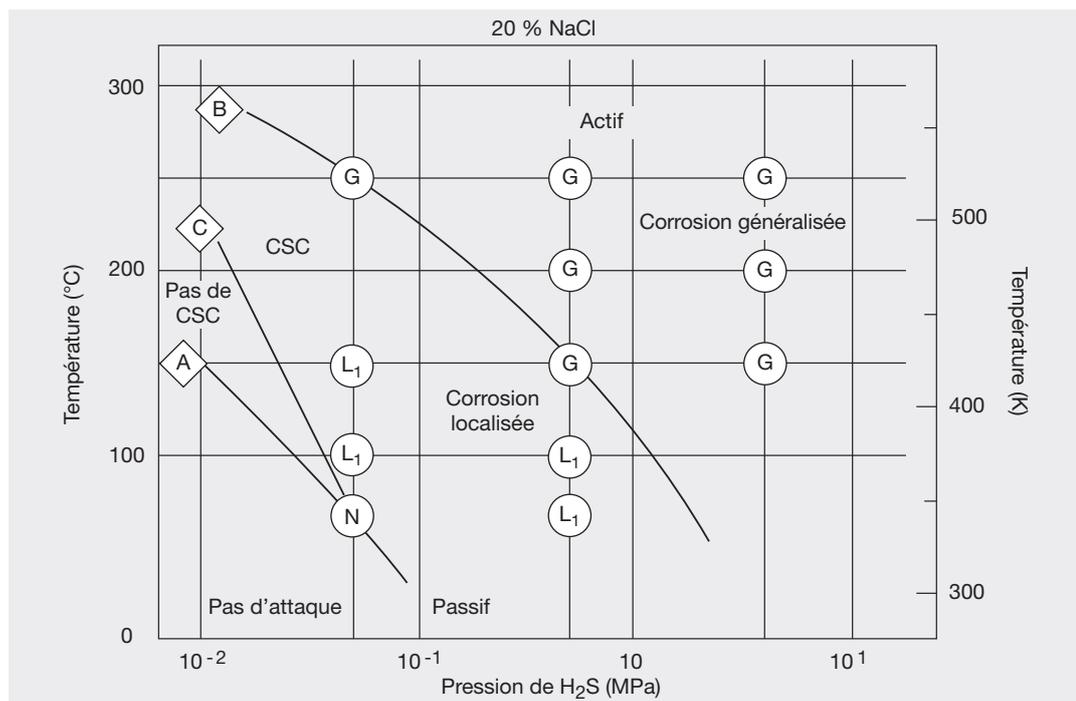


Figure 10 : Corrosion de l'acier duplex EN 1.4462 (2205) dans des solutions à 20 % de chlorure de sodium en présence de sulfure d'hydrogène. Prévisions (données électrochimiques) et résultats expérimentaux.

6 Spécifications des utilisateurs finaux et contrôle de la qualité

Dans la pratique, la conservation des propriétés après soudage constitue un enjeu important des spécifications et du contrôle de la qualité des constructions en acier duplex. Il est essentiel que la composition de l'acier et sa première transformation soient telles que les propriétés après soudage – selon des modes opératoires qualifiés – demeurent satisfaisantes.

6.1 Spécifications standard

6.1.1 Composition chimique

Les normes ASTM ou EN constituent le point de départ adéquat pour le choix d'un acier duplex de seconde génération. L'azote a un effet bénéfique : il évite un excès de ferrite dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et il favorise une plus grande stabilité métallurgique. La limite supérieure de la teneur en azote d'un acier duplex est déterminée par sa solubilité dans le métal fondu ; c'est ce que reflète la valeur maximale de la teneur en azote définie par les normes. En revanche, la teneur minimale en azote indiquée par ces mêmes normes peut ne pas refléter le niveau nécessaire pour obtenir la meilleure réponse pour le soudage. L'acier UNS S31803, qui constitue la spécification d'origine pour la nuance 2205, en est une illustration (Réf. 11).

A la limite inférieure de la fourchette 0,08–0,20 % admise pour l'azote dans le UNS S31803, l'acier 2205 présentait une réponse incohérente en termes de traitement thermique et de soudage. L'expérience a en fait montré qu'un minimum de 0,14 % d'azote était nécessaire pour les constructions soudées en acier 2205. Cette exigence ayant souvent été spécifiée, la version UNS S32205 du 2205 a été introduite pour répondre aux utilisateurs ayant besoin de souder. Les aciers superduplex, qui présentent des teneurs encore plus élevées en azote, sont la conséquence de la reconnaissance de l'importance de l'azote.

Certaines spécifications d'aciers duplex par les utilisateurs ont été basées sur le PREN. Le PREN peut être pertinent pour classer, en fonction de leur résistance à la corrosion, diverses nuances à l'intérieur d'une famille de compositions correctement équilibrées. Par contre, agir sur une composition pour atteindre un PREN donné ne conduit pas nécessairement à un équilibre métallurgique satisfaisant. Le PREN peut aider à choisir parmi les nuances possibles, mais appliqué aux variations à l'intérieur d'une même nuance, il suggère que le chrome et le molybdène seraient remplaçables par l'azote. Or, métallurgiquement, le chrome et le molybdène favorisent la ferrite et les phases intermétalliques, alors que l'azote favorise

l'austénite et empêche la formation de ces mêmes phases intermétalliques.

Par conséquent, l'idéal est de choisir la composition des nuances duplex sur la base des normes, en limitant éventuellement la teneur en azote aux valeurs supérieures de la plage définie pour chaque nuance. Quelle que soit la composition spécifiée, le matériau utilisé pour la qualification des modes opératoires de soudage (QMOS) doit être identique afin que ces qualifications soient représentatives des résultats pouvant être escomptés lors de la fabrication.

6.1.2 Recuit de mise en solution

Pour assurer une réponse uniforme au soudage, la composition chimique de l'acier est importante, mais aussi le recuit de mise en solution des produits sidérurgiques. Dans un acier inoxydable austénitique, le but du traitement de recuit est de recristalliser le métal et de mettre le carbone en solution. Avec les nuances bas carbone (L), l'acier inoxydable peut être trempé à l'eau ou refroidi relativement lentement à l'air parce que le temps nécessaire pour reformer des quantités préjudiciables de carbures est relativement long. Avec les aciers inoxydables duplex, même avec une teneur en azote idéale, des expositions de quelques minutes dans la plage des températures critiques est préjudiciable en termes de corrosion et de ténacité (Réf. 12). Lorsqu'un produit sidérurgique est refroidi lentement, le temps passé dans la plage 700–980 °C (1300–1800 °F) n'est plus disponible pour d'autres expositions thermiques - soudage par exemple - et le soudeur disposera de moins de temps pour faire une soudure qui soit dépourvue de phases intermétalliques dans la ZAT.

Les normes, ASTM par exemple, autorisent, pour certaines nuances duplex, la « trempe à l'eau ou un refroidissement rapide par d'autres moyens ». Le meilleur état métallurgique pour le soudage est obtenu lorsque la trempe qui suit le recuit est la plus rapide possible. Ceci fait toutefois l'impasse sur la déformation et les contraintes résiduelles accrues induites par la trempe à l'eau. Sur les lignes modernes de traitement des bobines, le refroidissement à l'air est extrêmement efficace pour les tôles en bandes. Pour les tôles fortes et les plaques, c'est la trempe à l'eau qui produit le meilleur état métallurgique pour le soudage. Dans tous les cas, laisser une tôle ou une pièce de tuyauterie se refroidir dans la plage 700–980 °C (1300–1800 °F) avant la trempe peut conduire à la formation de phases intermétalliques.

Une autre approche pour assurer des conditions initiales optimales consiste à exiger la réalisation d'essais sur les produits sidérurgiques livrés afin

de vérifier l'absence de phases intermétalliques dommageables. Pour cette vérification, l'ASTM A 923³ emploie l'examen métallographique, l'essai de choc ou l'essai de corrosion. La norme vérifie simplement si une précipitation dommageable s'est déjà produite. Les normes EN ne comportent pas de méthodes comparables. Elles reviennent à contrôler les procédures des usines afin de s'assurer de l'absence de formation de phases intermétalliques préjudiciables au cours de la première transformation de l'acier. Les essais de l'ASTM A 923 sont analogues aux essais ASTM A 262⁴ ou EN ISO 3651-2⁵ applicables aux aciers austénitiques pour déterminer leur sensibilisation du fait de la précipitation de carbures de chrome. L'ASTM A 923 couvre uniquement les aciers 2205 (S31803 et S32205), 2507, 255 et S32520, mais d'autres nuances duplex pourront être ajoutées à l'avenir. Beaucoup d'entreprises de transformation et d'usinage de l'acier ont intégré ces essais et d'autres essais analogues ou d'autres critères d'acceptation dans leurs QMOS.

6.2 Spécifications particulières

6.2.1 Essais de traction et essais de dureté

Comparés aux aciers inoxydables austénitiques, les aciers duplex possèdent une résistance élevée. Dans certains cas, les utilisateurs finaux ont imposé des limites à la résistance mécanique ou à la résilience. Il s'agit là probablement d'un transfert des pratiques usuelles pour les aciers martensitiques, pour lesquels les valeurs élevées de résistance ou de résilience sont causées par la martensite non écrouie. Or les aciers duplex ne forment pas de martensite lors du refroidissement. La résistance et la résilience élevées des aciers duplex sont le résultat de leur teneur en azote élevée, de leur structure biphasée ainsi que de l'écrouissage susceptible de se produire au cours des opérations de formage ou de dressage.

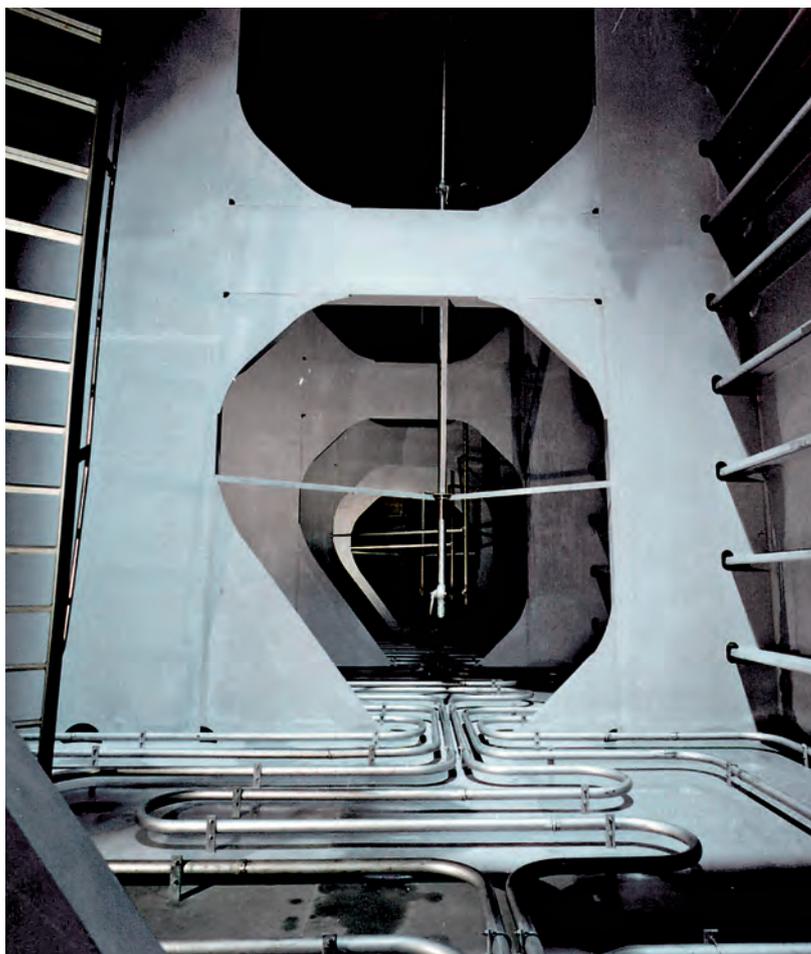
L'essai de dureté peut constituer un moyen efficace pour démontrer que la fabrication n'a pas entraîné d'écrouissage excessif. Lorsqu'on utilise l'essai de dureté à cette fin, il est important que la mesure soit faite à mi-distance entre la surface et le centre de la section, et non en surface, où il y a pu y avoir un écrouissage superficiel localisé.

6.2.2 Essais de pliage

Les essais de pliage peuvent servir à démontrer que les produits sidérurgiques sont exempts de fissures provenant du laminage. Mais ils peuvent être difficiles à mettre en œuvre pour les profilés lourds, les

petites pièces ou certaines géométries particulières. Ils donnent une vision optimiste de la qualité des aciers car le point de pliage peut ne pas coïncider avec l'emplacement d'une caractéristique inacceptable. Certaines conditions – une phase intermétallique à cœur, par exemple – sont peu susceptibles d'être détectées du fait du caractère directionnel du pliage.

Les essais de pliage sont utilisés communément dans le cadre des QMOS des aciers austénitiques en raison du risque de fissuration à chaud des soudures, particulièrement pour les constructions soudées fortement austénitiques soumises à un bridage important. L'utilité des essais de pliage pour détecter des problèmes d'intégrité des soudures d'aciers duplex est considérablement réduite en raison de la présence de ferrite ainsi que de la conductivité thermique supérieure et de la dilatation thermique inférieure de ces aciers. Les essais de pliage pourraient détecter des excès massifs de ferrite, à condition toutefois que l'emplacement de l'essai coïncide précisément avec la région affectée. Il est peu probable, par contre,



Intérieur de citerne en acier EN 1.4462 (2205) d'un chimiquier (Source : ThyssenKrupp Nirosta)

- 3 ASTM A 923 standard test methods for detecting detrimental intermetallic phases in duplex austenitic/ferritic stainless steels
- 4 ASTM A 262 standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels
- 5 EN ISO 3651-2 Détermination de la résistance à la corrosion intergranulaire des aciers inoxydables - Partie 2 : Aciers inoxydables ferritiques, austénitiques et austéno-ferritiques (duplex) - Essais de corrosion en présence d'acide sulfurique

qu'ils détecteront la présence de phases intermétalliques en faibles quantités, dont on sait pourtant qu'elles sont préjudiciables à la résistance à la corrosion et à la ténacité des constructions.

6.2.3 Essais de choc et examens métallographiques (phases intermétalliques)

Il y a deux manières d'employer un essai de choc pour la spécification d'un acier ou la qualification d'un mode opératoire. On peut :

- soit effectuer l'essai dans des conditions connues pour permettre de détecter les phases inacceptables – excès de ferrite ou phases intermétalliques, par exemple ;
- soit démontrer qu'une construction possède des propriétés suffisantes pour le service prévu.

Pour la première approche, l'ASTM A 923 fournit un essai pour l'acier 2205 : une perte de résilience inférieure à 54 J (40 ft-lb) dans un essai Charpy standard à -40 °C/°F sur éprouvette longitudinale (méthode B de l'ASTM A 923) indique l'existence d'une condition inacceptable au sein d'un produit en acier 2205 à l'état recuit. Pour s'assurer du caractère satisfaisant du traitement thermique et de la trempe, il faut exiger que l'essai selon l'ASTM 923, méthode B (ou méthode C, essai de corrosion) soit intégré au contrôle de la production et soit mis en œuvre pour chaque coulée. L'ASTM A 923 autorise également le recours à un examen métallographique (méthode A) comme essai discriminant pour l'acceptation d'un acier mais pas pour le rejet. En raison du niveau élevé de compétence métallographique que cette méthode nécessite, il peut être prudent, pour l'utilisateur final, d'exiger plutôt l'essai de corrosion (méthode C) que l'examen métallographique. Une manière de l'énoncer consiste à exiger l'indication de la vitesse de corrosion.

La méthode A de l'ASTM 923 présente toutefois l'avantage de permettre l'identification de la présence d'une phase intermétallique à cœur, comme indiqué sur la Figure 7 de la norme. Cette phase disqualifie un matériau avec la méthode A, mais ne conduira pas nécessairement au rejet du matériau avec la méthode B (essai de choc). Or elle peut entraîner une dédoubleure de la tôle pendant le formage, le découpage thermique ou le soudage. Par conséquent, il convient d'exiger la méthode A en complément de la méthode B ou C et d'imposer le rejet de tout matériau présentant une phase intermétallique à cœur. Bien que l'ASTM A 923 prévoie que la méthode A ne doit pas être employée pour le rejet, l'utilisateur final est en droit d'imposer des exigences plus sévères : un matériau faisant apparaître une phase intermétallique pratiquement à mi-épaisseur comme indiqué par la Figure 7 de l'ASTM 923 doit être rejeté.

L'essai de choc a une deuxième application, l'évaluation du métal de base, de la zone fondue et de la ZAT dans des conditions plus sévères que celles correspondant au service prévu. Cette application peut s'avérer à la fois conservatrice et économique. La température d'essai et le critère d'acceptation des soudures doivent être propres au type de soudure réalisé et être valablement liés aux conditions de service. La résilience ne sera pas aussi élevée que celle d'un acier duplex à l'état recuit. Une résilience inférieure du métal déposé n'est pas nécessairement indicative de phases intermétalliques mais résulte plus fréquemment d'une teneur accrue en oxygène, en particulier dans les méthodes de soudage sous flux.

L'ASME a publié de nouvelles normes applicables aux aciers duplex d'une épaisseur supérieure à 9,5 mm (0,375 in) (Réf. 13). Elles ont recours aux essais Charpy à la température minimale de calcul du métal (MDMT) ou à une température inférieure pour démontrer que le matériau de base et les soudures de production ont une ténacité suffisante pour le service prévu. Le critère d'acceptation est exprimé sous forme d'une expansion latérale. L'essai ASME diffère de l'essai ASTM A 923 en ce qu'il est réalisé sur trois éprouvettes (l'approche la plus commune pour mesurer la ténacité pour l'aptitude à l'emploi), avec indication à la fois des valeurs minimales et des valeurs moyennes obtenues. L'ASME exige des essais du métal de base, du métal d'apport et de la ZAT pour chaque coulée du métal de base et chaque lot de métal d'apport.

Pour limiter les essais tout en restant du côté de la sécurité, il est possible de ne retenir que la plus petite des deux températures d'essai (-40 °C/°F pour l'ASTM A 923 ou MDMT pour le code ASME) et de mesurer la ténacité à la fois sous la forme de l'énergie d'impact et de l'expansion latérale pour trois éprouvettes.

6.2.4 Métallographie et mesures magnétiques (équilibre des phases)

L'équilibre des phases austéno-ferritiques des produits sidérurgiques en acier duplex présente peu de variations entre coulées ou entre lots : les limites de composition chimique sont très étroites et les pratiques de recuit bien définies. Typiquement, l'acier EN 1.4462 (2205) contient 40–50 % de ferrite. De ce fait, la détermination de l'équilibre des phases dans les produits recuits présente un intérêt limité.

Cependant, la mesure du taux de ferrite peut être appropriée pour la qualification des modes opératoires de soudage, de manière à se prémunir d'un excès de ferrite dans la ZAT. La détermination précise de l'équilibre des phases pour un acier duplex nécessite habituellement un comptage métallographique – par exemple selon ASTM E 562 (manuel) ou

E 1245 (automatisé). Les aciers duplex étant ferromagnétiques, avec une imbrication extrêmement fine de l'austénite et de la ferrite, l'utilisation de méthodes magnétiques a une fiabilité limitée si l'on ne dispose pas d'étalons de référence de géométrie identique et dont l'équilibre des phases aura été déterminé par ailleurs par métallographie. Les normes AWS A4.2-91 et EN-ISO 8249⁶ décrivent des modes opératoires pour le calibrage des instruments magnétiques utilisés pour la mesure du taux de ferrite – indiqué sous forme d'indice de ferrite (Ferrite Number - FN) - dans les soudures des aciers duplex. La plage des équilibres de phases acceptables pour une soudure est nettement plus étendue que la plage acceptable pour le métal de base. Si la ténacité et la résistance à la corrosion de la soudure et de la ZAT sont acceptables – conditions démontrées par des essais tels ceux de l'ASTM A 923 –, une plage de ferrite de 25–75 % peut fournir les propriétés désirées de l'acier duplex. Sont considérés comme acceptables des FN compris entre 30 et 90.

Exiger la détermination de l'équilibre des phases pour un matériau qui est déjà au centre de service ou chez un négociant-stockiste revient plus cher que d'imposer la même exigence au matériau en cours de production. L'obtention de l'éprouvette et la réalisation d'un essai séparé peuvent également réduire la disponibilité en temps et heure.

Les phases intermétalliques étant amagnétiques, les essais magnétiques ne peuvent être employés pour détecter les phases sigma et chi.

6.2.5 Essais de corrosion

L'essai de corrosion des produits sidérurgiques à l'état recuit, méthode C de l'ASTM 923, constitue l'une des méthodes les plus économiques pour la mise en évidence de phases défavorables. La précipitation de phases intermétalliques et éventuellement de nitrures de chrome dans un équilibre de phases où la ferrite est en excès est mise en évidence sous forme d'une perte de résistance à la corrosion par piqûres. Ces phases intermétalliques entraînent un abaissement de 15 °C ou plus de la température critique de piqûration (CPT) par rapport à la température typiquement attendue pour un matériau correctement recuit. La mesure de la température critique réelle est relativement coûteuse parce qu'elle exige plusieurs essais d'une même éprouvette selon l'ASTM G 48 ou l'ASTM G 150. Par contre, la réalisation d'un essai de corrosion unique (ASTM 923, méthode C) à une température inférieure de 10–15 °C à la CPT type d'un acier duplex suffira à mettre en évidence la présence de phases préjudiciables. Pour cela, toute piqûre de corrosion sur les faces ou les chants doit être prise en compte dans l'évaluation. En effet, si, en service



Installation d'armatures en acier inoxydable duplex sur un tablier de pont de grande largeur (Source : Hardesty & Hanover, LLP)

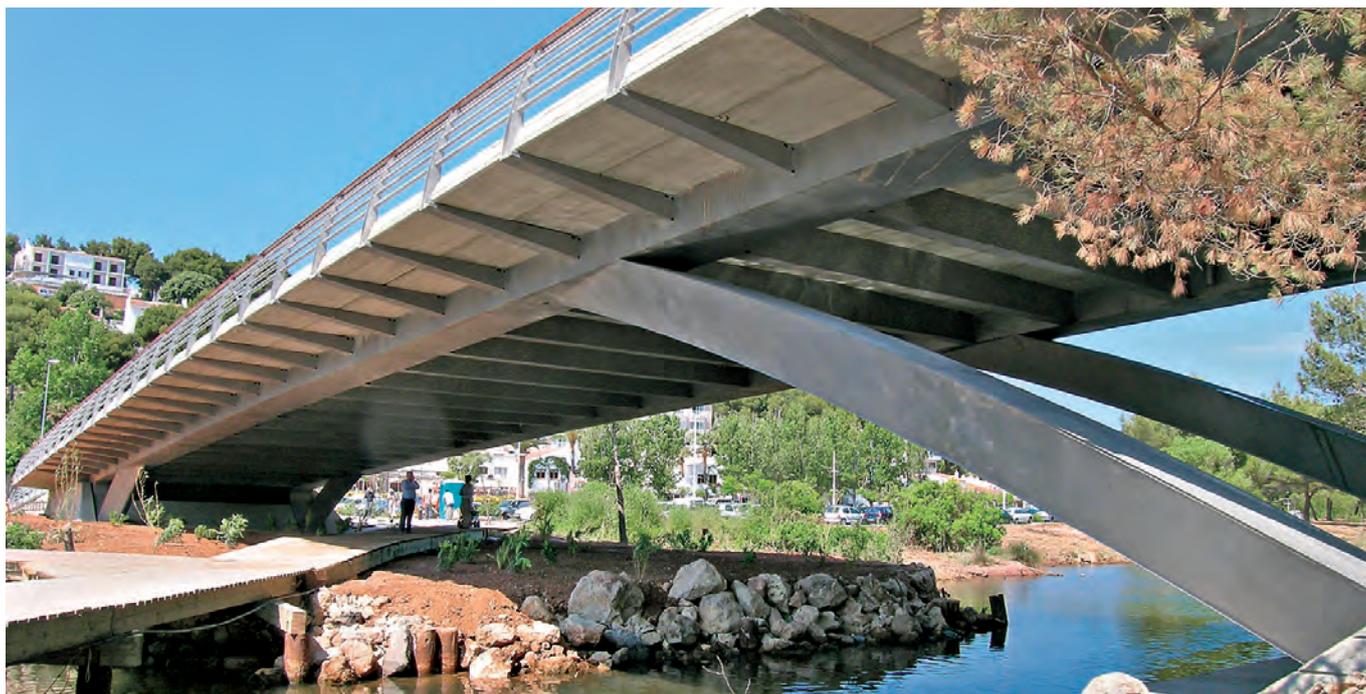
réel, les chants peuvent ne pas être exposés, les phases intermétalliques, qu'il s'agit de détecter par l'essai, ont une probabilité accrue d'être présentes à cœur, ce dont on tient compte lorsqu'on intègre l'attaque des chants.

Avant la mise au point de l'ASTM A 923, l'essai de corrosion était généralement exigé en faisant référence à « l'essai ASTM G 48 modifié ». Or l'ASTM G 48 décrit une méthode de laboratoire plutôt qu'un essai de réception. Exiger un essai selon l'ASTM G 48 ne suffit pas si l'on ne précise pas quelle méthode doit être appliquée et si on n'indique pas les autres paramètres de l'essai, notamment :

- la préparation de surface,
- la température de l'essai,
- la durée de l'essai,
- la prise en compte ou non de la corrosion des chants,
- la définition d'un critère d'acceptation.

L'essai C de l'ASTM A 923 est un essai de réception conçu pour démontrer d'une manière économique et relativement rapide l'absence de phases intermétalliques dommageables dans les produits sidérurgiques. Il exprime le critère d'acceptation sous la forme d'une vitesse de corrosion.

⁶ EN ISO 8249 Soudage – Détermination de l'indice de ferrite (FN) dans le métal fondu en acier inoxydable austénitique et duplex ferritique-austénitique au chrome-nickel



Pont à Cala Galdana sur l'île de Minorque, en acier inoxydable duplex EN 1.4462 (2205) (Source : PEDELTA)

Ceci peut sembler surprenant alors qu'il s'agit de détecter une corrosion par piqûres. En fait, cette approche a été utilisée pour deux raisons :

1. En fondant l'acceptation sur la perte de poids, on élimine la question difficile et potentiellement subjective de ce qu'est une piqûre de corrosion à la surface du métal. La perte de poids exigée pour le rejet est suffisamment importante pour pouvoir être aisément mesurée, mais suffisamment faible pour pouvoir détecter tout aussi aisément le type de piqûres de corrosion associé à la présence de phases intermétalliques au cours d'un essai sur 24 heures.
2. L'utilisation de la vitesse de corrosion permet de soumettre des éprouvettes de pratiquement n'importe quelle taille ou forme, sous réserve que l'on puisse déterminer l'aire de la surface totale.

L'essai de corrosion donne un résultat qui se situe du côté de la sécurité. Il est insensible à la géométrie et à l'emplacement de l'éprouvette, contrairement à l'essai Charpy, qui est sensible à l'orientation et à l'emplacement de l'entaille. L'essai de corrosion convient pour les QMOS, mais aussi pour un contrôle économique de la qualité des soudures de production lorsque des éprouvettes adéquates peuvent être

obtenues. On devra toutefois tenir compte de la différence de résistance à la corrosion entre les produits sidérurgiques recuits et un joint brut de soudage. Même correctement exécutée, une soudure peut, selon le mode opératoire appliqué, la nature de la protection gazeuse et la nuance de l'acier duplex soudé, présenter une CPT inférieure de 5 °C à 15 °C à la CPT du métal de base.

6.2.6 Soudage de production et contrôle des soudures

Les problèmes susceptibles de se poser avec l'acier duplex n'apparaissent pas de manière évidente au soudeur. Ils ne sont pas non plus détectables au moyen d'essais non destructifs. Le soudeur doit être conscient que la qualité globale de sa soudure, mesurée par sa résilience et sa résistance à la corrosion en service, tient au strict respect du mode opératoire de soudage. Les écarts par rapport au mode opératoire qualifié ne seront pas nécessairement détectables en atelier, mais ils sont susceptibles de mettre à mal la sécurité et les conditions économiques en service.

7 Propriétés mécaniques

Les aciers inoxydables duplex présentent des propriétés mécaniques exceptionnelles, récapitulées dans le **Tableau 5** pour les nuances standard. A l'état recuit, la limite d'élasticité à température ambiante est plus du double de celle des aciers inoxydables austénitiques standard non alliés à l'azote. Ceci devrait permettre aux bureaux d'études de réduire les épaisseurs de métal dans certaines applications. La **Figure 11** compare les limites d'élasticité typiques de plusieurs aciers duplex et de l'acier austénitique EN 1.4404 (AISI 316L) sur une plage de températures comprises entre la température ambiante et 300 °C (570 °F). En raison du danger de fragilisation de la phase ferritique à 475 °C (885 °F), il convient de ne pas maintenir les aciers duplex pendant des périodes prolongées à des températures supérieures à celles admises par le code de calcul des récipients sous pression (voir **Tableau 2**).

Les propriétés mécaniques des aciers duplex corroyés sont fortement anisotropes, c'est-à-dire qu'elles varient selon l'orientation. Cette anisotropie est liée à la forme allongée des grains et à la texture cristallographique résultant du laminage à chaud ou à froid (voir **Figure 2**), alors que la structure de solidification de l'acier duplex est typiquement isotrope. Le laminage, le forgeage, le recuit se faisant avec les deux phases en présence, leur aspect dans le produit final révèle le caractère directionnel du traitement. La résistance est plus élevée perpendiculairement au sens de laminage que dans le sens de celui-ci. La résilience est plus élevée lorsque l'entaille est placée perpendiculairement au sens du laminage. Elle sera plus élevée pour une éprouvette Charpy « longitudinale » (L-T) que pour d'autres directions d'essai. Pour une éprouvette prélevée dans le sens travers d'une plaque en acier duplex, l'énergie d'impact sera typiquement entre 1/2 et 2/3 de celle obtenue pour une éprouvette longitudinale.

Tableau 5 : Limites inférieures des propriétés mécaniques des tôles en acier inoxydable duplex, selon ASTM et EN

Nuance	ASTM			EN				
	N° UNS	Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % MPa (ksi)	Résistance à la traction MPa (ksi)	Allongement sur 2" %	N° EN	Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % MPa (ksi)	Résistance à la traction R _m MPa (ksi)	Allongement A ₅ %
2304	S32304	400 (58)	600 (87)	25	1.4362	400 (58)	630 (91)	25
2205	S32205	450 (65)	655 (95)	25	1.4462	460 (67)	640 (93)	25
2507	S32750	550 (80)	795 (116)	15	1.4410	530 (77)	730 (106)	20

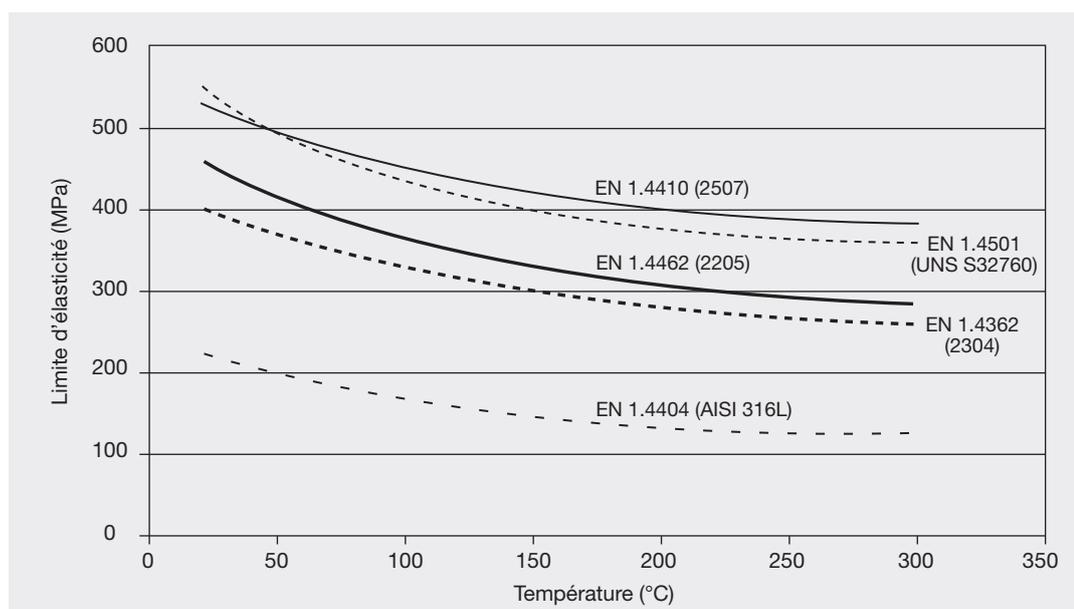


Figure 11 : Comparaison des limites d'élasticité usuelles des aciers inoxydables duplex et de l'acier EN 1.4404 (AISI 316L) entre la température ambiante et 300 °C (572 °F) (Source : données de producteurs)

Tableau 6 : Comparaison des spécifications de ductilité de l'ASTM A 240 et de l'EN 10088-2 pour les aciers duplex et les aciers austénitiques

ASTM A 240			EN 10088-2			
N° UNS	Nuance	Allongement min (%)	N° EN	Allongement min (%)*		
				P	H	C
S32003		25				
S32101		30	1.4162	30	30	30
S32202		30	1.4062			
S32304	2304	25	1.4362	25	20	20
S32205	2205	25	1.4462	25	25	20
S32750	2507	15	1.4410	20	15	15
S30403	304L	40	1.4307	45	45	45
S31603	316L	40	1.4404	45	40	40

P = tôle laminée à chaud H = bande laminée à chaud C = bande laminée à froid
* sens travers

En dépit de leur résistance élevée, les aciers inoxydables duplex présentent à la fois une bonne ductilité et une bonne ténacité. Comparés aux aciers au carbone ou aux aciers inoxydables ferritiques, ils présentent une transition ductile-fragile plus graduelle ; ils conservent une bonne ténacité y compris à faible température, par exemple à -40 °C/°F. Leur ductilité et

leur ténacité sont toutefois généralement inférieures à celles des aciers inoxydables austénitiques, qui ne présentent normalement pas de transition ductile-fragile et conservent une excellente ténacité jusqu'aux températures cryogéniques. Le Tableau 6 compare l'allongement minimal dans l'essai de traction pour les aciers austénitiques standard et les aciers duplex.

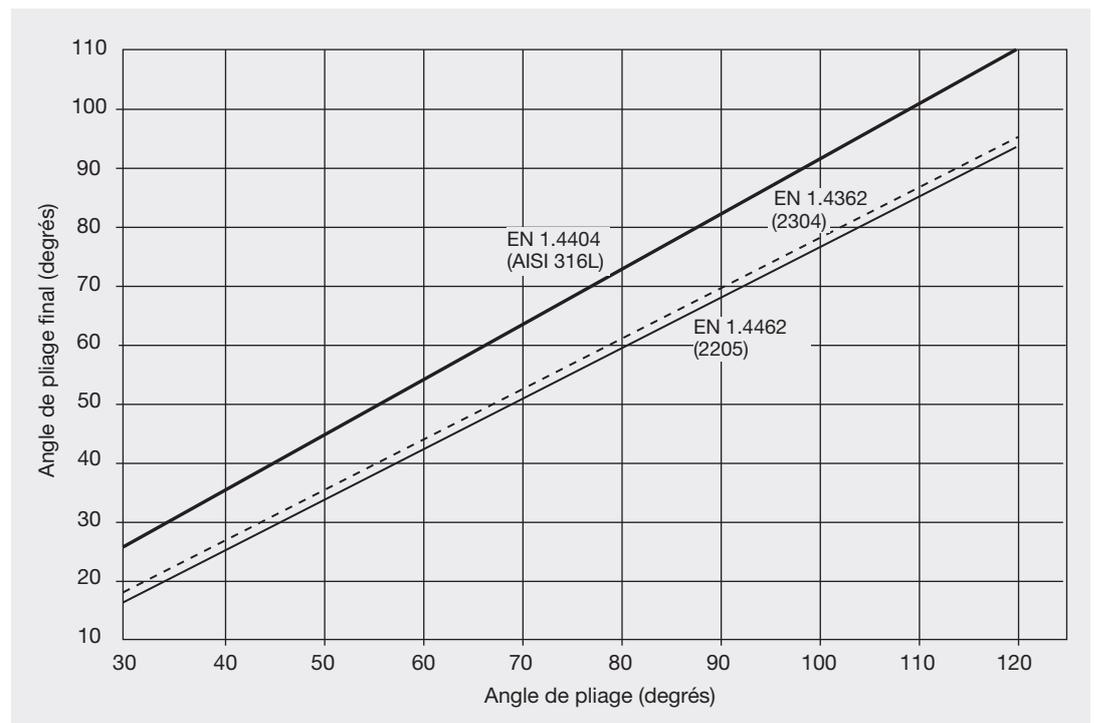


Figure 12 : Comparaison du retour élastique des aciers duplex et de l'acier EN 1.4404 (AISI 316L) – cas d'une tôle de 2 mm (0,08 in) d'épaisseur (Source : Outokumpu)

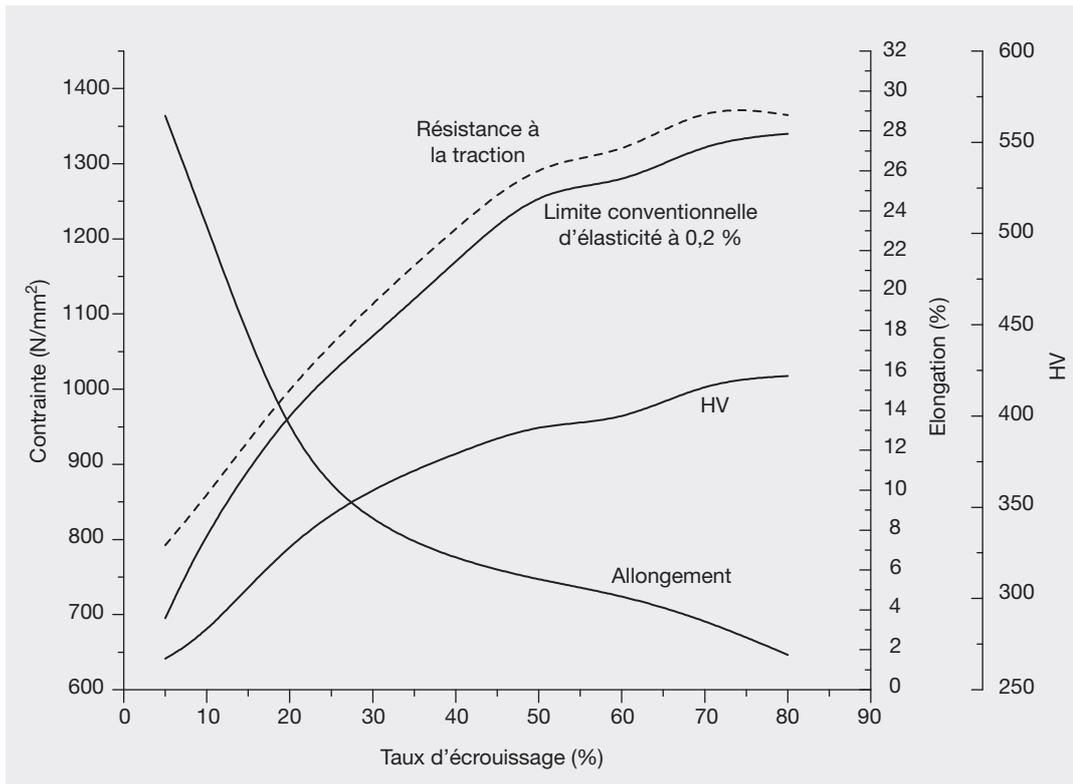


Figure 13 : Effet de l'écroutissage sur les propriétés mécaniques de l'acier duplex EN 1.4462 (2205) (Source : Baosteel)

Si la limite d'élasticité élevée des aciers duplex permet de réduire les épaisseurs – dans les limites du flambement et du module d'élasticité –, elle peut également soulever des difficultés lors de la fabrication. Du fait de leur résistance mécanique élevée, des efforts supérieurs sont nécessaires pour obtenir une déformation plastique. Dans les opérations de pliage, ceci se traduit par un retour élastique plus important que pour les aciers austénitiques. La Figure 12 compare le retour élastique de deux aciers duplex et d'un acier austénitique EN 1.4404 (AISI 316L). Les aciers duplex sont moins ductiles que les aciers austénitiques et des rayons de pliage supérieurs peuvent être nécessaires pour éviter la fissuration.

La forte ténacité et le taux d'écroutissage élevé des aciers duplex entraînent généralement une réduction de la durée de vie des outils dans les opérations d'usinage ou imposent des temps d'usinage supérieurs à ceux des nuances austénitiques standard. La ductilité des aciers duplex étant approximativement moitié de celle des aciers austénitiques, des cycles de recuit peuvent être nécessaires entre les différentes opérations de formage ou de pliage. L'effet de l'écroutissage sur les propriétés mécaniques de l'acier EN 1.4462 (2205) est montré sur la Figure 13.



Pose, sur son supportage vertical, d'un oléoduc calorifugé Ø 24 in. en acier EN 1.4462 (2205), Prudhoe Bay (Source : Arco Exploration and Production Technology)

8 Propriétés physiques

Le Tableau 7 présente les propriétés physiques à température ambiante d'une sélection d'aciers duplex, le Tableau 8 indiquant un certain nombre de propriétés aux températures élevées. Des données sont incluses à titre de comparaison pour un acier au carbone et plusieurs aciers austénitiques.

et reflètent probablement des différences dans les modes opératoires d'essai. Les propriétés physiques des aciers duplex se situent systématiquement entre celles des aciers austénitiques et celles des aciers au carbone, mais tendent à être plus proches de celles des aciers austénitiques.

Les différences de valeurs des propriétés physiques sont à chaque fois très faibles entre nuances duplex

Tableau 7 : Propriétés physiques, à température ambiante, des aciers duplex comparés à des aciers au carbone et austénitiques (Source : données de producteurs)

Nuance	N° UNS	Masse volumique		Chaleur spécifique		Résistivité électrique		Module d'élasticité	
		g/cm ³	lb./in ³	J/kg K	Btu/lb./°F	micro Ω m	micro Ω in.	GPa	x10 ⁶ psi
Acier au carbone	G10200	7,64	0,278	447	0,107	0,10	3,9	207	30,0
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	7,98	0,290	502	0,120	0,73	28,7	193	28,0
EN 1.4401 (AISI 316)	S31600	7,98	0,290	502	0,120	0,75	29,5	193	28,0
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900	7,70	0,280	460	0,110	0,80	31,5	200	29,0
	S31500	7,75	0,280	482	0,115			200	29,0
	S32101	7,80	0,281	500	0,119	0,80	31,5	200	29,0
EN 4362 (2304)	S32304	7,75	0,280	482	0,115	0,80	31,5	200	29,0
	S31803	7,80	0,281	500	0,119	0,80	31,5	200	29,0
EN 1.4462 (2205)	S32205	7,80	0,281	500	0,119	0,80	31,5	200	29,0
	S31260	7,80	0,281	502	0,120			200	29,0
	S32750	7,85	0,285	480	0,114	0,80	31,5	205	29,7
255	S32550	7,81	0,282	488	0,116	0,84	33,1	210	30,5
	S39274	7,80	0,281	502	0,120			200	29,0
	S32760	7,84	0,281			0,85	33,5	190	27,6
	S32520	7,85	0,280	450	0,108	0,85	33,5	205	29,7
EN 1.4410 (2507)	S32750	7,79	0,280	485	0,115	0,80	31,5	200	29,0

Tableau 8 : Propriétés physiques, à température élevée, des aciers duplex comparés à des aciers au carbone et austénitiques (Source : données de producteurs)

Nuance	N° UNS	20 °C (68 °F)	100 °C (212 °F)	200 °C (392 °F)	300 °C (572 °F)	400 °C (754 °F)	500 °C (932 °F)
Module d'élasticité en traction en fonction de la température, en GPa (ksi × 1000)							
Acier au carbone	G10200	207 (30,0)					
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	193 (28,0)	192 (27,9)	183 (26,6)	177 (25,7)	168 (24,4)	159 (23,0)
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900	200 (29,0)	195 (28,0)	185 (27,0)			
	S31500	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
	S32101	200 (29,0)	194 (28,0)	186 (27,0)	180 (26,1)		
EN 1.4362 (2304)	S32304	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
	S31803	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
EN 1.4462 (2205)	S32205	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
255	S32550	210 (30,5)	200 (29,9)	198 (28,7)	192 (27,8)	182 (26,4)	170 (24,7)
	S32520	205 (29,7)	185 (26,8)	185 (26,8)	170 (24,7)		
EN 1.4410 (2507)	S32750	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
Coefficient de dilatation thermique entre 20 °C (68 °F) et T, en 10⁻⁶/K (10⁻⁶/°F)							
Acier au carbone	G10200	Sans objet	12,1 (6,70)	13,0 (7,22)		14 (7,78)	
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	Sans objet	16,4 (9,10)	16,9 (9,40)	17,3 (9,60)	17,6 (9,80)	18,0 (10,0)
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900	Sans objet	10,9 (6,10)	11,0 (6,30)	11,6 (6,40)	12,1 (6,70)	12,3 (6,80)
	S31500	Sans objet	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
	S32101	Sans objet	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)		
EN 1.4362 (2304)	S32304	Sans objet	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
	S31803	Sans objet	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
EN 1.4462 (2205)	S32205	Sans objet	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
255	S32550	Sans objet	12,1 (6,72)	12,6 (7,00)	13,0 (7,22)	13,3 (7,39)	13,6 (7,56)
	S32520	Sans objet	12,5 (6,94)	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)		
EN 1.4410 (2507)	S32750	Sans objet	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
Conductivité thermique en fonction de la température, en W/m K (Btu in/hr ft² °F)							
Acier au carbone	G10200	52 (360)	51 (354)	49 (340)		43 (298)	
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	14,5 (100)	16,2 (112)	17,8 (123)	19,6 (135)	20,3 (140)	22,5 (155)
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900						
	S31500	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
	S32101	15,0 (105)	16,0 (110)	17,0 (118)	18,0 (124)		
EN 1.4362 (2304)	S32304	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
	S31803	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
EN 1.4462 (2205)	S32205	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
255	S32550	13,5 (94)	15,1 (105)	17,2 (119)	19,1 (133)	20,9 (145)	22,5 (156)
	S32520	17,0 (118)	18,0 (124)	19,0 (132)	20,0 (138)		
EN 1.4410 (2507)	S32750	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)

9 Découpage

Pour le découpage des aciers duplex, on peut recourir aux mêmes procédés que ceux utilisés habituellement avec les aciers austénitiques et les aciers au carbone, mais certains ajustements de paramètres seront nécessaires afin de tenir compte des différences dans les propriétés mécaniques et la réponse thermique.

9.1 Sciage

En raison de leur résistance élevée, de leur fort taux d'écrouissage et de la quasi-absence d'inclusions pour briser les copeaux, les aciers inoxydables duplex sont plus difficiles à scier que les aciers au carbone. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des machines puissantes, des systèmes d'alignement de lames robustes, des lames à grosse denture, des vitesses de sciage lentes à modérées, des pressions d'avance fortes et un débit généreux de liquide réfrigérant, idéalement une émulsion synthétique assurant en même temps la lubrification et le refroidissement et appliquée de telle sorte que la lame entraîne le liquide à l'intérieur de la pièce. La vitesse de sciage et la vitesse d'avance à retenir sont semblables à celles utilisées pour l'acier austénitique EN 1.4401 (AISI 316).

9.2 Cisailage

Pour cisailer les aciers duplex, on utilise les mêmes matériels que pour les aciers de type EN 1.4301 (AISI 304) et EN 1.4401 (AISI 316), généralement sans ajustements particuliers. Cependant, compte tenu de la plus grande résistance au cisaillement des aciers duplex, la puissance de la cisaille doit être supérieure ou l'épaisseur cisailée réduite.

La résistance au cisaillement des aciers inoxydables est égale à environ 58 % de leur résistance ultime à la traction, tant pour les tôles laminées à chaud que pour les tôles laminées à froid. Les aciers duplex se comportent à la manière des aciers inoxydables du type AISI 316, mais de plus forte épaisseur, dans le rapport de leurs résistances au cisaillement respectives. Par conséquent, l'épaisseur maximale de l'acier duplex EN 1.4362 (2304) ou EN 1.4462 (2205) qui peut être cisailée avec une cisaille donnée est égale à 85 % environ de celle qui peut être cisailée pour un acier de type EN 1.4301 (AISI 304) ou EN 1.4401 (AISI 316). L'épaisseur maximale des aciers superduplex pouvant être cisailés avec une cisaille donnée est environ 65 % de celle des nuances austénitiques courantes.

9.3 Refendage

On utilise des refendeuses conventionnelles pour cisailer les larges bandes ou les feuillards en acier duplex. L'acier inoxydable, enroulé en bobine, est alimenté par une dérouleuse ; il passe entre les axes supérieur et inférieur de la ligne de refendage portant les lames de la cisaille circulaire ; les brins obtenus sont ensuite reboinés sur l'enrouleur. La position des lames



Refendage d'une bobine d'acier duplex
(Source : ThyssenKrupp Nirosta)

est réglée en fonction de la largeur de refendage désirée. En raison de la résistance mécanique supérieure des aciers duplex comparés aux aciers austénitiques, il est plus difficile de maîtriser l'usure de l'outil et la régularité des rives ; le maintien d'une bonne qualité des rives des bobines refendues exige l'utilisation de lames en acier à outils ou de lames en carbure.

9.4 Poinçonnage

Le poinçonnage peut être considéré comme une forme particulière, difficile, de cisailage. Leur résistance mécanique élevée, leur rapide écrouissage et leur résistance au déchirement rendent les aciers duplex relativement difficiles à poinçonner et abrasifs pour l'outillage. L'expérience en la matière est limitée, mais dire, à titre indicatif, que l'acier duplex se comportera comme un acier austénitique d'épaisseur double constitue un bon point de départ pour aborder les questions de poinçonnage. Les aciers duplex plus fortement alliés, avec des niveaux plus élevés en azote, sont nettement plus difficiles à poinçonner.

9.5 Découpe plasma et découpe laser

Les aciers inoxydables duplex sont couramment découpés avec le même matériel de découpe plasma et de découpe laser que celui utilisé pour les aciers inoxydables austénitiques. La conductivité thermique légèrement plus élevée et la faible teneur en soufre usuelle des aciers duplex peuvent avoir une légère incidence sur l'optimisation des paramètres, mais des résultats acceptables peuvent être obtenus sans ajustement particulier. La zone affectée thermiquement par le processus de découpe plasma est en général étroite, de l'ordre de 0,25 mm (0,010 in), du fait de la rapidité de la découpe qui s'effectue en une passe, avec un refroidissement rapide de la plaque ou de la tôle. Elle disparaîtra avec l'usinage normal pour la préparation des joints et la fusion du métal de base adjacent lors du soudage.

10 Formage

10.1 Formage à chaud

Les aciers inoxydables duplex présentent une excellente formabilité à chaud, nécessitant des efforts de formage relativement faibles jusqu'à 1230 °C (2250 °F) au moins. Mais si le formage s'effectue à une température trop basse, les déformations s'accumulent dans la ferrite moins résistante et aussi moins ductile, ce qui peut avoir pour conséquence la fissuration de celle-ci dans la région déformée. Une température de formage trop basse peut en outre entraîner une précipitation de phase sigma en quantités importantes.

La plupart des producteurs recommandent une température de formage maximale comprise entre 1100 °C (2000 °F) et 1150 °C (2100 °F). Cette limite supérieure est proposée en raison de l'effet des températures élevées sur la stabilité dimensionnelle des pièces et sur la formation de calamine, favorisée à haute température. Aux températures élevées, l'acier duplex devient particulièrement malléable et les pièces fabriquées – fonds de cuves ou tubes, par exemple –, si elles ne bénéficient pas d'un supportage adéquat, se gauchissent ou fléchissent dans le four, ou bien l'acier devient trop malléable pour certaines opérations de formage. Le **Tableau 9** récapitule les plages de températures préconisées pour le formage à chaud ainsi que les températures minimales de chauffage à cœur. Il n'est pas nécessaire ni toujours recommandé de commencer le formage à la température maximale indiquée, mais, dans tous les cas, l'acier doit avoir atteint la température minimale de chauffage à cœur avant le début du formage. Pour éviter un échauffement lent, passant par la plage de températures dans laquelle il y a formation de la phase sigma, on chargera le four à chaud.

L'homogénéité des températures est importante pour le succès du formage à chaud des aciers duplex. Si la

forme de la pièce n'est pas compacte, les bords peuvent être significativement plus froids que le cœur, avec un risque de fissuration dans les régions plus froides. Pour éviter cela, il est nécessaire de réchauffer la pièce dès que la température de ces régions risque de s'abaisser au-dessous de la température minimale de formage indiquée. La limite basse de la plage de températures préconisée peut être abaissée légèrement, mais uniquement si l'homogénéité des températures dans la pièce, particulièrement sur les bords ou dans les sections plus minces, est maintenue.

Avec les profilés lourds, il convient de vérifier si la trempe à l'eau est suffisamment rapide pour empêcher la précipitation des phases intermétalliques. L'épaisseur limite est de l'ordre de 150 mm à 200 mm (6–8 in) pour les plaques corroyées en acier EN 1.4462 (2205) et de 75 mm à 125 mm (3–5 in) pour les plaques corroyées en acier superduplex, les limites exactes variant avec la composition de l'acier et l'efficacité de l'équipement de trempe. Pour les formes cylindriques simples, le diamètre est limité à environ 375 mm (15 in). Si la pièce finie doit comporter un trou débouchant, le refroidissement de la pièce après le recuit final est considérablement amélioré lorsque le trou est percé ou usiné avant le traitement thermique final.

10.1.1 Recuit de mise en solution

Le formage à chaud doit être suivi d'un recuit de remise en solution et d'une trempe rapide afin de reconstituer entièrement les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion de l'acier. La pièce doit être amenée à une température supérieure à la température minimale de recuit et maintenue à cette température suffisamment longtemps pour dissoudre tous les précipités intermétalliques. En se plaçant du côté de la sécurité, on peut indiquer à titre indicatif que le temps global de maintien en température doit

Tableau 9 : Plages de température pour le formage à chaud des aciers duplex et températures minimales de chauffage à cœur (les nuances austénitiques courantes sont incluses à titre de comparaison) (Source : données de producteurs)

Nuance	N° UNS	N° EN	Plage de température pour le formage à chaud		Température minimale de chauffage à cœur	
			°C	°F	°C	°F
	S32101	1.4162	1100 à 900	2000 à 1650	950	1750
2304	S32304	1.4362	1150 à 950	2100 à 1740	980	1800
2205	S32205	1.4462	1230 à 950	2250 à 1740	1040	1900
2507	S32750	1.4410	1230 à 1025	2250 à 1875	1050	1920
	S32520	1.4507	1230 à 1000	2250 à 1830	1080	1975
	S32760	1.4501	1230 à 1000	2250 à 1830	1100	2010
304	S30400	1.4301	1205 à 925	2200 à 1700	1040	1900
316	S31600	1.4401	1205 à 925	2200 à 1700	1040	1900

être comparable au temps total du maintien entre 650 °C et 980 °C (1200–1800 °F) ayant suivi le recuit complet précédent. La pièce doit ensuite subir une trempe à l'eau. Lors du transfert vers le lieu de trempe, le maintien prolongé (plusieurs minutes) dans la plage 700–1000 °C (1300–1830 °F) est à proscrire.

Les températures minimales de recuit des aciers duplex sont récapitulées dans le Tableau 10. A ces températures, les aciers duplex sont relativement malléables et, en l'absence de supportage adéquat, il est probable qu'on assistera à un gauchissement et une déformation des pièces. Ceci peut constituer un problème important dans le cas des produits tubulaires, en particulier ceux de grand diamètre à parois minces. Le recalibrage ou le dressage des produits gauchis est plus difficile que pour les aciers austénitiques, en raison de la résistance mécanique élevée des aciers duplex à température ambiante. Les tentatives pour réduire au maximum ces déformations par des durées de recuit réduites, une montée en température lente ou l'utilisation d'une température de recuit inférieure à la température recommandée peuvent ne pas permettre de dissoudre les phases intermétalliques, voire causer la formation de quantités additionnelles de phases intermétalliques, ce qui abaissera la résistance à la corrosion et réduira la ténacité.

Le recours aux traitements thermiques de détentionnement, pour réduire les contraintes d'écrouissage induites par le formage ou le dressage, n'est pas recommandé. Par nature, les aciers duplex présentent une très bonne résistance à la corrosion sous contrainte en milieu chloruré et la réduction des contraintes d'écrouissage ne pourra l'améliorer que marginalement. De fait,

Tableau 10 : Températures minimales de recuit de mise en solution pour les aciers duplex (Source : données de producteurs et ASTM A 480)

Nuance	N° UNS	Température minimale de recuit de mise en solution	
		°C	°F
EN 1.4362 (2304)	S32304	980	1800
	S32003	1010	1850
	S32001	1040	1900
	S32101	1020	1870
	S32202	980	1800
	S82011	1010	1850
	EN 1.4462 (2205)	S32205	1040
S32506		1020 à 1120	1870 à 2050
S32520		1080 à 1120	1975 à 2050
255	S32550	1040	1900
EN 1.4410 (2507)	S32750	1025 à 1125	1880 à 2060
	S32760	1100	2010

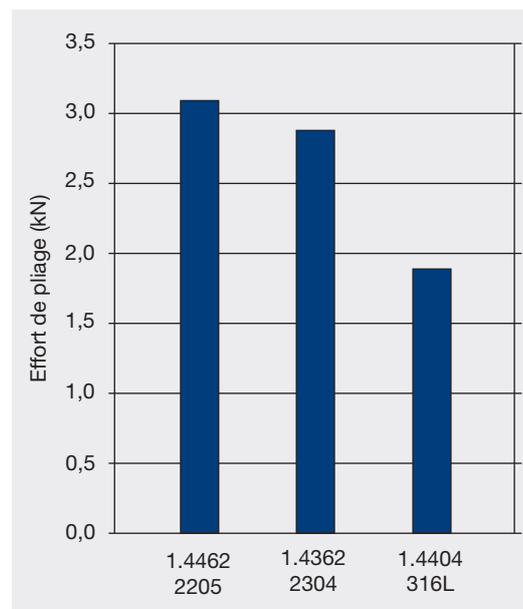


Figure 14 : Effort minimal requis pour le début de la déformation plastique lors du pliage d'éprouvettes de 50 mm (2 in) de large et 2 mm (0,08 in) d'épaisseur en acier EN 1.4362 (2304), EN 1.4462 (2205) et EN 1.4404 (AISI 316L) (Source : Outokumpu)

il n'existe pas de température satisfaisante, au-dessous de la température de recuit de remise en solution, pour laquelle le détentionnement pourrait être employé sans risque de formation de phases intermétalliques, nuisibles pour la résistance à la corrosion et la ténacité.

10.2 Formage à température modérée

Il est parfois utile de chauffer modérément une pièce pour en faciliter le formage. Cependant, un chauffage prolongé des aciers duplex au-dessus de 315 °C (600 °F) peut avoir comme conséquence une certaine perte de ténacité ou de résistance à la corrosion à température ambiante, due à la fragilisation à 475 °C (885 °F) (voir Figure 5). Aux températures supérieures, il y a le risque d'un effet encore plus rapide et plus néfaste, celui de la précipitation de phases intermétalliques. Ces phases n'interférant pas avec le processus de formage, il est donc possible de chauffer modérément les aciers duplex pour le formage. Cependant, lorsque la température de formage dépasse environ 300 °C (570 °F), il convient de faire suivre le formage d'un recuit complet de mise en solution suivi d'une trempe rapide (voir Tableau 10).

10.3 Formage à froid

Les aciers duplex ont fait preuve d'une bonne formabilité dans une grande variété de situations. La plupart des applications des aciers duplex nécessitent une mise en forme relativement simple – roulage des formes cylindriques, emboutissage ou roulage des fonds de cuves, par exemple. Dans la plupart de ces applications, la préoccupation principale porte sur la résistance mécanique élevée de l'acier duplex et la puissance

des équipements nécessaires. En première approche, on estime généralement qu'un acier duplex répondra au formage de manière analogue à une nuance austénitique de la série AISI 300 d'épaisseur double. La **Figure 14** compare l'effort minimal requis pour initier la déformation plastique de pliage pour plusieurs aciers inoxydables. Des réductions d'épaisseur sont possibles dans le cas des aciers duplex, mais elles seront moins importantes que ne le laisserait prévoir l'augmentation de la limite d'élasticité. Même avec un matériel suffisamment puissant, on devra tenir compte du retour élastique accru, dû à la résistance élevée des nuances duplex (voir Figure 12).

La ductilité inférieure des aciers duplex, comparés aux aciers inoxydables austénitiques, doit également être prise en compte. La plupart des spécifications imposent un allongement minimal de 15 % à 30 % pour les nuances duplex, contre 40 % pour bon nombre de nuances austénitiques. Les allongements réels peuvent être légèrement supérieurs, mais le rapport suggéré par ces valeurs minimales est correct et constitue une bonne référence pour les opérations de formage à froid. Dans le cas d'opérations de formage poussées ou complexes, les nuances duplex, en raison de leur faible ductilité, requièrent soit un rayon de pliage plus important que les nuances austénitiques soit un recuit intermédiaire.

10.4 Emboutissage

Les aciers inoxydables duplex se laissent facilement emboutir. Mais souvent, l'acier duplex est utilisé en remplacement pour une pièce qui a été optimisée pour un acier austénitique, un acier au carbone ou un acier ferritique et le premier essai est effectué sans modification de l'épaisseur de la pièce. Bien que la résistance mécanique supérieure de la nuance duplex puisse justifier une réduction d'épaisseur, le coût d'une nouvelle conception peut repousser le moment où ce choix se traduira par un avantage en termes de coût (lié à une réduction du poids). Dans la plupart des cas, une réduction de l'épaisseur faciliterait effectivement le formage, mais elle est souvent considérée comme délicate à réaliser au stade des essais de formage initiaux.

Par comparaison avec le formage des aciers au carbone ou des aciers ferritiques, les problèmes rencontrés avec les aciers duplex sont liés presque entièrement à leur résistance mécanique et à leur retour élastique. Les aciers duplex présentent une limite d'élasticité supérieure d'environ 30–50 %. Les aciers ferritiques présentent un taux d'érouissage limité et l'effort appliqué peut être relativement faible. À l'inverse, les aciers duplex ont, dès l'origine, une résistance élevée, qui croît encore par la suite, de sorte que le retour élastique pose problème. D'un autre côté, les aciers duplex présentent une ductilité supérieure, permettant de compenser le retour élastique par un surpliage. Par ailleurs, comparés aux aciers ferritiques, les aciers duplex sont moins sensibles aux sens relatifs du pliage et du laminage. Ils présentent une certaine anisotropie des propriétés mécaniques

en raison du laminage, mais, du fait de leur plus grande ductilité, cet effet est moins marqué, dans la pratique, que pour les aciers ferritiques.

Le formage des tôles en acier inoxydable ferritique tire souvent un parti intéressant de l'emboutissage profond. Dans cette opération, la tôle se déforme dans son plan, avec un amincissement minimal à mesure que la tôle pénètre dans la matrice. L'aptitude des aciers ferritiques à l'emboutissage profond est fortement avantagée par la formation de la texture métallographique. On s'est peu intéressé à ce mode de formage pour les aciers duplex ; il semble toutefois peu probable que la structure duplex permette d'obtenir un comportement aussi favorable et la technologie sera vraisemblablement significativement différente des pratiques connues pour les aciers ferritiques ou austénitiques.

Dans le cas de la comparaison avec les aciers austénitiques, plus fréquente, les ajustements doivent tenir compte à la fois de la résistance mécanique plus élevée et de la ductilité plus faible des nuances duplex. Les propriétés d'emboutissage des aciers duplex sont limitées par la phase ferritique, et elles ne possèdent pas le taux d'érouissage élevé qui permet aux aciers austénitiques d'être emboutis aussi massivement.

10.5 Repoussage

La résistance mécanique et la résistance à la corrosion des aciers duplex, particulièrement leur résistance à la corrosion sous contrainte en milieu chloruré, en font des candidats prisés pour des applications dans des pièces tournantes telles celles utilisées dans les centrifugeuses. Le repoussage, ou fluotournage, est une méthode économique fréquemment employée pour la réalisation de ces pièces.

Le repoussage constitue une opération complexe, fortement dépendante du matériel utilisé et des compétences de l'opérateur. On l'emploie couramment avec les aciers austénitiques, qui exigent toutefois souvent de nombreux traitements de recuit intermédiaires afin de restaurer la ductilité au cours de la séquence de formage. L'expérience limitée dont on dispose en matière de repoussage des aciers duplex montre la nécessité d'efforts de formage très élevés, surtout lorsqu'aucune réduction d'épaisseur n'est faite par rapport aux aciers austénitiques. Avec des matériels suffisamment robustes et puissants, le repoussage de nuances duplex s'effectue sans problème. Leur ductilité inférieure peut toutefois imposer des recuits intermédiaires plus fréquents que pour les nuances austénitiques. La planéité et la minimisation du « bombé » du flan initial sont importantes pour la réponse en repoussage. Cependant, un planage important (dressage par galets, par exemple) peut épuiser une partie de la ductilité nécessaire pour la première phase du repoussage. Certaines pièces en acier inoxydable duplex ont été réalisées par repoussage à des températures supérieures à 650 °C (1200 °F), suivi d'un recuit de remise en solution complet.

11 Usinage

Les limites d'élasticité des aciers inoxydables duplex sont en général à peu près le double de celles des nuances austénitiques sans azote, avec un taux d'écrouissage initial au moins comparable à celui des nuances austénitiques courantes. Les copeaux formés lors de l'usinage des aciers duplex sont durs et abrasifs pour l'outillage, et ce d'autant plus qu'il s'agit de nuances plus fortement alliées. Les aciers duplex étant produits avec une teneur en soufre aussi faible que possible, la fragmentation des copeaux n'est guère facilitée.

Pour ces raisons, il est généralement plus difficile d'usiner les aciers duplex que les aciers austénitiques de la série AISI 300, de résistance à la corrosion comparable. Ils nécessitent des efforts de coupe supérieurs et entraînent une usure de l'outil plus rapide. L'usinabilité plus difficile apparaît surtout avec les outillages carbure. Ceci est illustré sur la Figure 15, qui compare les indices d'usinabilité de différents aciers duplex et de l'acier EN 1.4401 (AISI 316). On notera en particulier l'indice supérieur du duplex lean EN 1.4162 (UNS S32201) comparé à l'acier EN 1.4401 (AISI 316).

11.1 Recommandations générales

Les recommandations qui suivent s'appliquent de manière générale à tous les aciers inoxydables, mais leur importance est encore accrue pour les aciers duplex :

- Utiliser des machines puissantes, rigides, avec des porte-outils et porte-pièce extrêmement robustes et rigides (pour des opérations similaires, les efforts de coupe seront généralement beaucoup plus élevés pour les aciers duplex que pour les aciers austénitiques correspondants).
- Réduire au maximum les vibrations en maintenant la longueur d'outil aussi faible que possible.
- Limiter le rayon de la pointe de l'outil à la valeur juste nécessaire.
- Pour les outils carbures, préférer une géométrie garantissant à la fois la finesse et la résistance de l'arête tranchante.
- Concevoir les gammes d'usinage de manière à ce que la profondeur de passe descende toujours au-dessous de la couche écrouie résultant des passes antérieures.

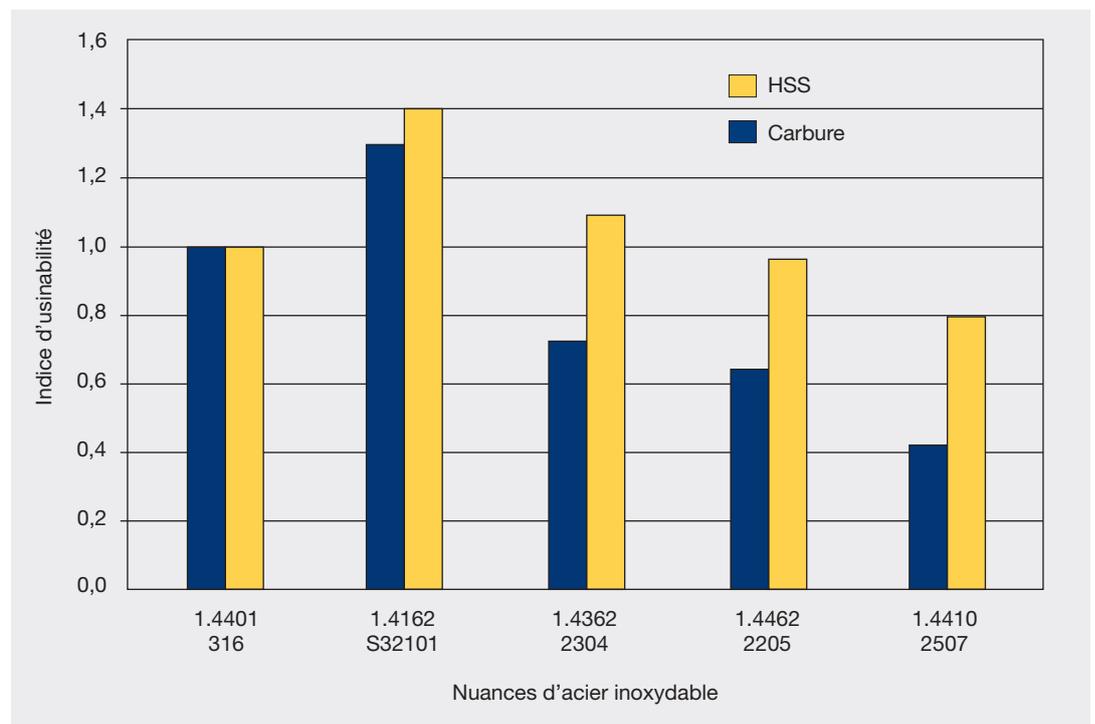


Figure 15 : Usinabilité relative des aciers inoxydables duplex et de l'acier EN 1.4401 (AISI 316) – outillage en carbure cémenté et outillage en acier rapide (Source : Outokumpu)

- Adopter une vitesse appropriée, sans excès, afin d'éviter les phénomènes d'arête rapportée ainsi qu'une usure trop rapide.
- Changer les plaquettes ou les réaffûter à intervalles réguliers de manière à avoir des arêtes tranchantes vives.
- Arroser abondamment d'un liquide réfrigérant/lubrifiant, sous forme d'huile ou d'émulsion, avec additifs extrême pression (EP).
- Employer des plaquettes en carbure revêtu, avec brise-copeau positif.

11.2 Tournage

Les opérations de tournage font intervenir un nombre si important de paramètres qu'il est impossible de faire des recommandations spécifiques qui s'appliqueraient à toutes les situations. La Figure 16 et le Tableau 11 fournissent des indications générales. On peut utiliser des outils carbure, qui permettront des vitesses plus élevées que les aciers à outillage rapides. Ils nécessitent toutefois une attention accrue vis-à-vis de la rigidité de l'outillage et de la pièce, et les coupes discontinues sont à éviter.

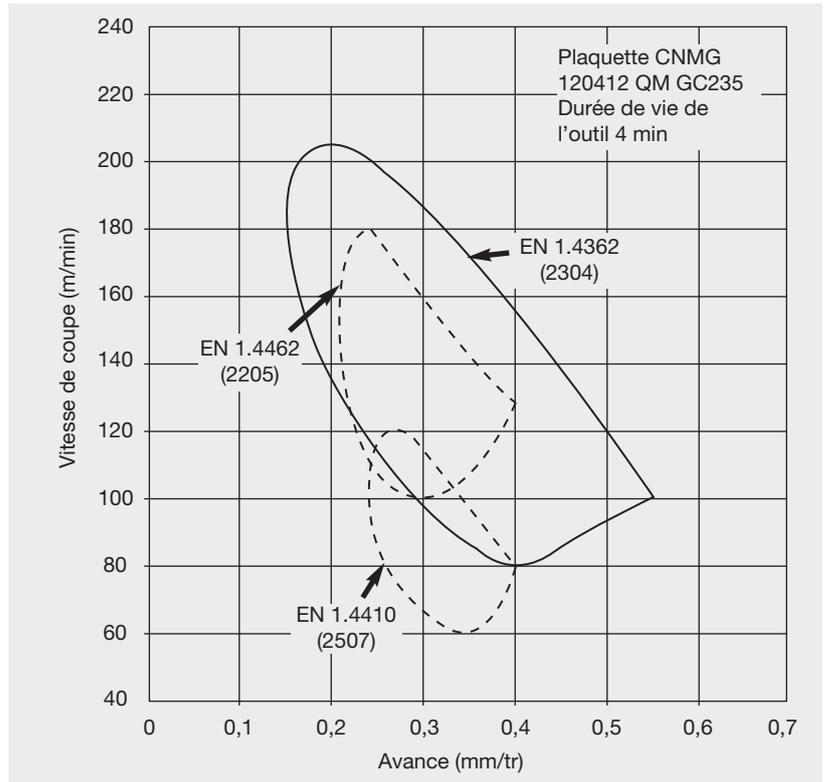


Figure 16 : Comparaison des paramètres de tournage des aciers duplex avec plaquette en carbure cémenté, durée de vie de l'outil de quatre minutes (Source : Sandvik)

Tableau 11 : Recommandations générales pour le dressage des aciers duplex (Source : Outokumpu)

Acier inoxydable (ou paramètres d'usinage)	Carbures				Outils en acier rapide	
	Ebauche		Finition		Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse de coupe (sfm)
	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse de coupe (sfm)	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse de coupe (sfm)		
EN 1.4162 (S32101)	170–240	560–790	200–280	660–925	20–30	65–100
EN 1.4362 (2304)	120–160	400–525	150–210	500–680	18–25	60–85
EN 1.4462 (2205)	90–120	300–400	120–160	400–525	15–20	50–65
Superduplex	50–70	165–230	70–105	230–350	10–15	35–50
Avance (par tour)	0,3–0,6 mm	0,012–0,024 in.	0,05–0,3 mm	0,002–0,012 in.	0,05–0,2 mm	0,002–0,008 in.
Profondeur de passe	2–5 mm	0,080–0,200 in.	0,5–2 mm	0,020–0,080 in.	0,5–2 mm	0,020–0,080 in.
Nuance	2101, 2304, 2205 : ISO P20–P35 (C5) Superduplex : ISO P30–P50		2101, 2304, 2205 : ISO P10–P15 (C6–C7) Superduplex : ISO P25–P35		Qualité supérieure	



Opération de tournage (Source : Seco Tools)

11.3 Fraisage en bout (carbures cémentés)

Le Tableau 12 fournit des indications générales pour le fraisage en bout des aciers duplex avec des carbures cémentés.

- Pour le fraisage d'ébauche, utiliser des plaquettes revêtues ou d'une nuance dure. Pour une finition plus fine, on peut employer une plaquette encore plus dure.
- Procéder au fraisage en avalant, avec une épaisseur moyenne de copeau d'au moins 0,1 mm (0,004 in). Ajuster l'avance proportionnellement, avec un facteur de 1,0 à 0,7 lorsque l'angle d'attaque varie de 45 ° à 90 °.
- Afin d'assurer une bonne éjection du copeau par l'outil, ne pas employer de liquide réfrigérant, notamment pendant l'opération d'ébauche.

11.4 Perçage

Les Tableaux 13 et 14 fournissent des indications générales pour le perçage des aciers duplex au moyen de forets HSS.

- Géométrie des forets : angle de pointe 130 ° ; pointes à auto-centrage recommandées ; amincissement de l'âme recommandé pour les forets de grand diamètre.
- Liquide réfrigérant : émulsion à 10 %, arrosage généreux à la pointe de l'outil ; pour des profondeurs supérieures à 2 fois le diamètre, retirer les copeaux périodiquement en arrosant dans le trou.
- Vitesses accrues : un revêtement TiN permet un accroissement de la vitesse de 10 % ; l'emploi d'un foret à lubrification interne permet un accroissement de 10–20 %.

Tableau 12 : Recommandations générales pour le fraisage en bout des aciers duplex avec des outils en carbure cémenté (Source : Outokumpu)

Acier inoxydable (ou données d'usinage)	Ebauche		Finition	
	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse de coupe (sfm)	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse de coupe (sfm)
EN 1.4162 (UNS S32101)	180–230	595–760	200–250	660–825
EN 1.4362 (2304)	100–130	330–425	130–150	425–525
EN 1.4462 (2205)	50–80	165–260	80–110	260–360
EN 1.4410 (2507)	30–50	100–165	50–70	165–230
Avance (par dent)	0,2–0,4 mm	0,008–0,016 in.	0,1–0,2 mm	0,004–0,008 in.
Profondeur de passe	2–5 mm	0,080–0,200 in.	1–2 mm	0,040–0,080 in.
Nuance de carbure	EN 1.4162 (UNS S32101), EN 1.4362 (2304), EN 1.4462 (2205) : ISO P20–P40 Superduplex : ISO P25–P40		EN 1.4162 (UNS S32101), EN 1.4362 (2304), EN 1.4462 (2205) : ISO P10–P25 Superduplex : ISO P20–P30	

Tableau 13 : Paramètres pour le perçage des aciers duplex à l'aide d'un foret en acier rapide, unités SI (Source : Outokumpu)

Diamètre du foret (mm)	Vitesse de coupe (m/min)				Avance (mm/tr)			
	EN 1.4162 (UNS S32101)	EN 1.4362 (2304)	EN 1.4462 (2205)	Super-duplex	EN 1.4162 (UNS S32101)	EN 1.4362 (2304)	EN 1.4462 (2205)	Super-duplex
1-3	12-37	6-10	6-8	5-8	0,05			0,04
5	12-37	10-12	10-12	9-11	0,10			0,08
10	12-37	12-15	10-12	9-11	0,20			0,15
15	12-37	12-15	10-12	9-11	0,25			0,20
20	12-37	12-15	10-12	9-11	0,30			0,25
30	12-37	12-15	10-12	9-11	0,35			0,30
40	12-37	12-15	10-12	9-11	0,41			0,35

Tableau 14 : Paramètres pour le perçage des aciers duplex à l'aide d'un foret en acier rapide, unités anglo-saxonnes (Source : Outokumpu)

Diamètre du foret (in.)	Vitesse de coupe (sfm)				Avance (mm/tr)			
	EN 1.4162 (UNS S32101)	EN 1.4362 (2304)	EN 1.4462 (2205)	Super-duplex	EN 1.4162 (UNS S32101)	EN 1.4362 (2304)	EN 1.4462 (2205)	Super-duplex
0,040-0,120	40-120	20-33	20-25	16-25	0,002			0,0015
0,2	40-120	33-40	33-40	30-36	0,004			0,003
0,4	40-120	40-50	33-40	30-36	0,008			0,006
0,6	40-120	40-50	33-40	30-36	0,01			0,008
0,8	40-120	40-50	33-40	30-36	0,012			0,01
1,2	40-120	40-50	33-40	30-36	0,014			0,012
1,6	40-120	40-50	33-40	30-36	0,016			0,014

12 Soudage

12.1 Recommandations générales

12.1.1 Différences entre aciers duplex et aciers austénitiques

Les problèmes de soudage des aciers inoxydables austénitiques, lorsqu'ils existent, sont le plus souvent liés au métal déposé, notamment la tendance à la fissuration à chaud dans le cas d'une solidification entièrement ou principalement austénitique. Pour les aciers austénitiques les plus courants, l'ajustement de la composition du métal d'apport, destinée à obtenir une teneur en ferrite significative, limite ces problèmes. Pour les aciers austénitiques plus fortement alliés, nécessitant un métal d'apport à base de nickel et pour lesquels la solidification austénitique est inévitable, le problème est traité en réduisant l'apport thermique, ce qui nécessite souvent de multiplier les passes pour réaliser la soudure.

Du fait de leur teneur élevée en ferrite, les aciers duplex présentent une très bonne résistance à la fissuration à chaud. Le problème des fissures à chaud est donc rarement à prendre en considération lors du soudage. Les préoccupations portent sur la ZAT et non sur le métal déposé. Les problèmes de ZAT sont une perte de résistance à la corrosion, une perte de ténacité ou une fissuration post-soudage. Pour éviter ces problèmes, le mode opératoire doit se concentrer sur la réduction du temps total de maintien à la température dans la plage d'incandescence de 500 °C à 790 °C, plutôt que sur le contrôle de l'apport thermique pour chaque passe. L'expérience a montré que cette approche peut s'avérer optimale tant du point de vue technique que du point de vue économique.

Avec cette introduction à l'esprit, il est possible d'énoncer un certain nombre de recommandations générales pour le soudage des aciers duplex, puis d'appliquer ces principes et ces recommandations à des méthodes de soudage spécifiques.

12.1.2 Choix du matériau de base

La réponse des aciers duplex au soudage peut varier de manière substantielle en fonction de leur chimie ou des transformations subies. L'importance d'une teneur en azote suffisante a été régulièrement soulignée. Si le matériau de base a été refroidi lentement au travers de la plage 700 °C à 1000 °C (1300 °C à 1800 °F) ou si on l'a laissé se refroidir à l'air à ces températures pendant une minute environ avant la trempe à l'eau, le temps dont dispose le soudeur pour réaliser la soudure sans apparition dommageable de réactions de précipitation se trouve en partie consommé. Il est important que l'état métallurgique de l'acier employé dans la fabrication réelle corresponde à la même qualité – composition et techniques de production – que celle de l'acier utilisé pour les QMOS. Le choix de la composition et la spécification des essais appropriés pour le métal de base ont été présentés dans le chapitre relatif aux spécifications des utilisateurs finaux et au contrôle de la qualité (Chapitre 6).

12.1.3 Nettoyage avant soudage

La prescription prévoyant de faire précéder le soudage d'un nettoyage de toutes les parties qui seront chauffées ne s'applique pas seulement aux aciers duplex, elle s'applique à tous les aciers inoxydables. Les compositions chimiques d'un métal de base et de son métal d'apport sont développées en supposant l'absence de toute source additionnelle de contamination. Les salissures, graisses, huiles, peintures et humidité de toute sorte interféreront avec les opérations de soudage et auront un effet négatif sur la résistance à la corrosion et les propriétés mécaniques de l'assemblage soudé. Toute QMOS est vaine si le métal n'est pas nettoyé à fond avant le soudage.

12.1.4 Conception des joints

Dans le cas des aciers inoxydables duplex, la conception des joints doit faciliter la pleine pénétration et éviter la présence de métal de base non dilué dans le métal d'apport qui se solidifie. Il vaut mieux réaliser la préparation du joint par usinage plutôt que par meulage afin d'obtenir une hauteur de talon et un écartement des bords uniformes. Lorsqu'un meulage des portées est nécessaire, il convient d'apporter une attention particulière à la régularité de la préparation et de la mise à joint. Toute bavure de meulage doit être éliminée de manière à assurer une fusion et une pénétration complètes. Dans le cas d'un acier austénitique, un soudeur qualifié peut corriger certaines



Réacteur de délignification à l'oxygène, en acier EN 1.4462 (2205), Entreprise Steel Fab, Kalowna, Prince George, Colombie Britannique, Canada (Source : Outokumpu)

insuffisances dans la préparation du joint en jouant avec sa torche. Dans le cas d'un acier duplex, par contre, ceci peut entraîner une exposition plus longue que prévu dans la plage des températures dommageables, conduisant à des résultats non conformes à ceux du mode opératoire qualifié.

La Figure 17 illustre certaines formes de joints utilisées avec les aciers inoxydables duplex. D'autres conceptions sont possibles, sous réserve qu'elles assurent une pleine pénétration des soudures et réduisent au minimum le risque de trou par excès de chauffage.

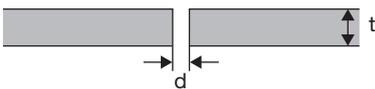
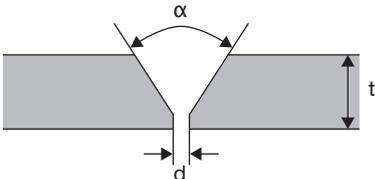
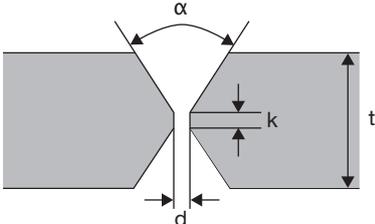
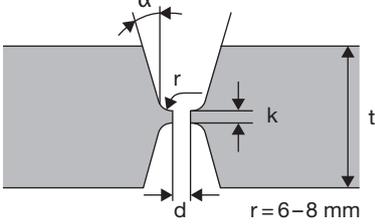
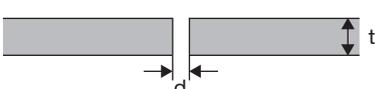
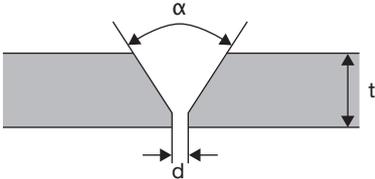
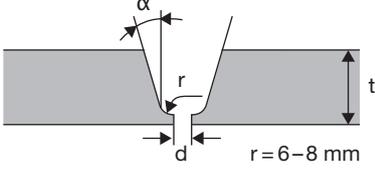
Gorge de soudage	Méthode	Epaisseur t (mm)	Ecartement d (mm)	Racine k (mm)	Chanfrein α (°)
	GTAW	3-5	1-3	-	-
	GMAW	3-6	1-3	-	-
	SMAW	3-4	1-3	-	-
	SMAW	4-15	1-3	1-2	55-65
	GTAW	3-8	1-3	1-2	60-70
	GMAW	5-12	1-3	1-2	60-70
	SAW	9-12	0	5	80
	SMAW	>10	1.5-3	1-3	55-65
	GMAW	>10	1.5-3	1-3	60-70
	SAW	>10	0	3-5	90
	SMAW	>25	1-3	1-3	10-15
	GMAW	>25	1-3	1-3	10-15
	SAW	>25	0	3-5	10-15
	GTAW	>3	0-2	-	-
	GMAW	>3	0-2	-	-
	SMAW	>3	0-2	-	-
	SMAW	3-15	2-3	1-2	60-70
	GTAW	2.5-8	2-3	1-2	60-70
	GMAW	3-12	2-3	1-2	60-70
	SAW	4-12	2-3	1-2	70-80
	SMAW	12-60	1-2	2-3	10-15
	GTAW	>8	1-2	1-2	10-15
	GMAW	>12	1-2	2-3	10-15
	SAW	>10	1-2	1-3	10-15

Figure 17 : Exemples de conceptions de joints pour le soudage des aciers duplex (Source : Aperam)

12.1.5 Préchauffage

En règle générale, le préchauffage n'est pas recommandé, car il est susceptible d'être préjudiciable. Il ne doit pas être intégré aux modes opératoires, à moins d'une justification particulière. Il peut en effet être bénéfique lorsqu'il est utilisé pour éliminer l'humidité à la surface de l'acier, comme cela peut se produire en conditions ambiantes froides ou en cas de condensation nocturne. Dans ce cas, on chauffera uniformément l'acier à une température d'environ 100 °C (200 °F), ce chauffage ne devant intervenir qu'après le nettoyage suivant la préparation des soudures.

12.1.6 Apport thermique et température interpasse

Les aciers inoxydables duplex peuvent tolérer des apports thermiques relativement élevés. La structure duplex de solidification du métal déposé est résistante à la fissuration à chaud, beaucoup plus que celle des métaux d'apport austénitiques. Les aciers duplex, avec une conductivité thermique supérieure et un coefficient de dilatation thermique inférieur, ne développent pas des contraintes thermiques localisées au niveau des soudures avec la même intensité que les aciers austénitiques. Le bridage de la soudure doit être limité, mais la fissuration à chaud n'est généralement pas un problème.

Un apport thermique trop faible peut entraîner un excès de ferrite dans la zone fondue et dans la ZAT, avec une perte correspondante de ténacité et de résistance à la corrosion. Un apport thermique excessif, quant à lui, augmente le risque de formation de phases intermétalliques. Pour éviter les problèmes dans la ZAT, le mode opératoire de soudage doit prévoir un refroidissement rapide de cette région après soudage. La température de la pièce est un paramètre important : c'est elle qui a le plus grand effet sur le refroidissement de la ZAT. A titre indicatif, on limitera la température interpasse maximale à 150 °C (300 °F) pour les duplex lean et standard et à 100 °C (210 °F) pour les superduplex. Cette limitation doit être imposée lors de la qualification du mode opératoire de soudage et le soudage de production doit être surveillé de manière à garantir que la température interpasse ne dépasse pas celle utilisée pour la qualification. Les sondes électroniques et les thermocouples constituent les instruments préférentiels pour la surveillance de cette température. Permettre à une pièce, dans le cadre de la QMOS, d'atteindre une température entre passes inférieure à celle qui peut raisonnablement ou économiquement être obtenue dans le cadre de la fabrication réelle ne serait pas judicieux ni prudent. Lorsque le nombre de passes à réaliser est important, prévoir les soudures de manière à laisser un temps suffisant pour permettre le refroidissement entre les passes constitue une bonne pratique, économique de surcroît.

12.1.7 Traitement thermique post-soudage

Le détentionnement post-soudage n'est pas nécessaire dans le cas des aciers duplex. Il est d'ailleurs probablement préjudiciable, le traitement thermique étant susceptible de précipiter des phases intermétalliques ou une phase alpha prime (475 °C/885 °F), avec fragilisation et perte de ténacité et de résistance à la corrosion. Les températures de traitement thermique post-soudage supérieures à 315 °C (600 °F) peuvent affecter négativement la ténacité et la résistance à la corrosion des aciers duplex.

Tout traitement thermique post-soudage doit inclure un recuit complet de remise en solution suivi d'une trempe à l'eau (voir Tableau 10). Un tel traitement est à considérer après tout soudage autogène car la microstructure sera fortement ferritique si un métal d'apport surallié n'est pas employé pour le soudage.

Si le soudage doit être suivi d'un tel traitement thermique, par exemple lors de la fabrication d'un raccord de tuyauterie, celui-ci doit être intégré au mode opératoire de soudage. Le traitement de recuit permet d'éliminer les problèmes liés aux phases intermétalliques et à l'excès de ferrite, qui peuvent alors être tolérés à titre transitoire.

12.1.8 Equilibrage des phases

On dit souvent que l'équilibre des phases des aciers duplex est un équilibre 50-50, avec des quantités égales d'austénite et de ferrite. Mais ceci n'est pas strictement vérifié et l'équilibre des aciers duplex modernes est établi avec 40 % à 50 % de ferrite, le complément étant de l'austénite. Il est généralement admis que les avantages caractéristiques des aciers duplex sont obtenus avec au moins 25 % de ferrite (complété par l'austénite pour l'équilibre). Dans certains procédés de soudage, en particulier ceux sous flux, l'équilibre des phases a été ajusté vers plus d'austénite pour améliorer la ténacité et compenser la perte de celle-ci liée à la reprise d'oxygène du flux. La ténacité de ces métaux d'apport est nettement inférieure aux valeurs élevées qui sont possibles pour une tôle ou un tube à l'état recuit, mais elle peut être suffisante pour le service prévu. Aucune des méthodes de soudage ne produira une ténacité aussi élevée que celle obtenue pour le produit corroyé à l'état recuit. La limitation de la teneur en ferrite du métal d'apport à une valeur supérieure au minimum exigé pour l'acier duplex à l'état recuit peut entraîner une limitation inutile des méthodes de soudage applicables.

L'équilibre des phases dans la ZAT, qui correspond à la tôle ou au tube corroyés de départ plus un cycle thermique additionnel, est habituellement légèrement plus ferritique que le métal d'origine. La détermination métallographique précise de l'équilibre des phases

dans la ZAT est pratiquement impossible. Si cette région est fortement ferritique, cela peut indiquer le cas peu commun d'une trempe extrêmement rapide, conduisant à un excès de ferrite et à la perte de ténacité.

12.1.9 Soudage de métaux dissemblables

Les aciers duplex peuvent être soudés à d'autres aciers duplex, à des aciers austénitiques, à des aciers au carbone et à des aciers faiblement alliés.

Pour souder des aciers duplex à d'autres nuances duplex, on emploie le plus souvent des duplex avec une teneur en nickel supérieure à celle des métaux de base. La teneur élevée en nickel du métal d'apport garantit la formation d'un niveau adéquat d'austénite dans la soudure lors du refroidissement.

Dans le cas du soudage avec des nuances austénitiques, on utilise typiquement des métaux d'apport austénitiques à bas carbone, avec une teneur en molybdène intermédiaire entre celle des deux aciers ; on utilise fréquemment l'AWS E309LMo/ER309LMo. Ce même métal d'apport, ou encore l'AWS E309L/ER309L, sont couramment utilisés pour assembler les aciers duplex aux aciers au carbone et aux aciers faiblement alliés. Si l'on utilise des métaux d'apport à base de nickel, ils doivent être exempts de niobium (columbium). Les aciers austénitiques ayant une résistance mécanique inférieure à celle des nuances



Structure métallographique du métal duplex EN 1.4462 (2205) déposé, 500x (Source : Lincoln Smitweld bv)

duplex, les joints soudés réalisés avec des métaux d'apport austénitiques ne seront pas aussi robustes que l'acier duplex de base.

Le Tableau 15 récapitule les métaux d'apport fréquemment employés pour souder les aciers duplex à des aciers différents. Ces exemples font apparaître les désignations AWS des électrodes (E), mais selon le procédé, la géométrie du joint et d'autres considérations, les fils nus (désignation ER) et les fils fourrés peuvent être pris en considération.

Tableau 15 : Consommables utilisés pour le soudage de métaux dissemblables

	1.4362 (2304), 1.4162 (S32101) 1.4062 (S32202), S82011	1.4462 (2205) S32003	Duplex 25 % Cr Superduplex
1.4362 (2304)	23Cr-7Ni-N	E2209	E2209
1.4162 (S32101)	E2209		
1.4062 (S32202) S82011	E309L		
EN 1.4462 (2205) S32003	E2209	E2209	25Cr-10Ni-4Mo-N
Duplex 25 % Cr Superduplex	E2209	25Cr-10Ni-4Mo-N	25Cr-10Ni-4Mo-N
1.4301 (304)	E2209 E309L E309LMo	E2209 E309LMo	E2209 E309LMo
1.4401 (316)	E2209 E309LMo	E2209 E309LMo	E2209 E309LMo
Acier au carbone	E2209	E2209	E2209
Acier faiblement allié	E309L E309LMo	E309L E309LMo	E309L E309LMo

12.2 Qualification des modes opératoires de soudage

Avec les aciers austénitiques standard, les essais usuels de qualification des modes opératoires de soudage sont relativement simples, et le nombre d'essais nécessaires pour qualifier un métal de base, un métal d'apport, et une méthode de soudage est limité. Avec les essais de dureté et les essais de pliage (pour l'identification de la martensite et de la fissuration à chaud, respectivement), ces essais de qualification reflètent une longue expérience des écueils rencontrés avec les aciers ferritiques, martensitiques ou austénitiques. Il est peu probable que les aciers duplex aient des difficultés avec ces exigences, mais il est également peu probable que ces essais permettent d'identifier des phases intermétalliques ou la présence de ferrite en excès, qui constituent les vrais problèmes susceptibles d'être rencontrés avec les aciers duplex. En outre, en raison de la nécessité de limiter le temps total de maintien en température pour la ZAT, les propriétés des nuances duplex seront sensibles à l'épaisseur de la section et aux détails d'exécution des soudures de production. La « qualification » doit par conséquent être considérée dans un sens plus large, c'est-à-dire la démonstration que les modes opératoires de soudage qui seront appliqués en production ne produiront pas une perte inacceptable des caractéristiques techniques, notamment de la ténacité et de la résistance à la corrosion des aciers.

Pour une sécurité maximale, il faudrait qualifier les modes opératoires pour chaque épaisseur et chaque géométrie de joint, car des divergences mineures peuvent avoir des conséquences significatives dans la production réelle. Mais la nature complexe des constructions effectives rend de tels essais coûteux.

Des économies sont réalisées en qualifiant les modes opératoires identifiés comme les plus critiques pour l'acier duplex considéré (épaisseur de la section, métal d'apport et procédé de soudage).

12.3 Procédés de soudage

Les aciers duplex de seconde génération ont connu un développement commercial important, dont l'origine se situe au début des années 1980. Une compréhension limitée du rôle de l'azote dans le contrôle de la stabilité des phases a fait qu'on s'est concentré initialement sur la limitation des apports thermiques. Des limitations sévères ont alors conduit à considérer bon nombre des procédés de soudage les plus économiques, avec des taux de dépôt élevés, tels que le soudage à l'arc sous flux en poudre, comme inadaptés pour les aciers duplex. Mais les propriétés de ces aciers sont si appréciées que beaucoup d'efforts ont été déployés afin d'appréhender la manière dont les procédés de soudage les plus économiques pouvaient être employés. Il en est résulté que, à l'exception du soudage oxyacétylénique – en raison de la contamination du cordon de soudure par le carbone –, pratiquement tous les procédés sont aujourd'hui utilisés pour le soudage des aciers duplex.

12.3.1 Soudage TIG avec électrode réfractaire et gaz inerte

Le soudage TIG avec électrode réfractaire et gaz inerte (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW) est particulièrement utile pour des petits cordons de soudure manuels. Il peut être automatisé dans le cas de géométries simples, mais n'est généralement pas économique comme procédé principal lorsqu'il s'agit d'effectuer un grand nombre de soudures sur des équipements de grandes dimensions. Néanmoins, bon nombre de fabrications nécessitent aussi un certain nombre de soudures TIG en complément d'un autre procédé utilisé à titre principal. Il convient donc généralement de qualifier des modes opératoires TIG pour des réparations ou des finitions localisées.

Équipement

Les soudures TIG sont exécutées de préférence avec une source de courant continu et un générateur HF pour faciliter l'amorçage de l'arc. Les soudures TIG doivent être réalisées en courant continu et polarité directe (DCSP), l'électrode étant au pôle négatif. L'utilisation en courant continu et polarité inverse (DCRP) entraîne la détérioration de l'électrode.

On utilisera de préférence une électrode en tungstène avec 2 % de thorium (spécification AWS 5.12, classification EWTh-2). Le contrôle de l'arc est facilité lorsque l'électrode est affûtée à l'aide d'une meuleuse de manière à obtenir une pointe avec un angle au sommet de 30 à 60 degrés, adoucie à l'extrémité. Dans le cas d'un soudage TIG automatisé, l'angle idéal pour obtenir la pénétration devra être déterminé à partir d'un petit nombre d'essais en production réelle.



Installation de séparation du pétrole ; acier inoxydable EN 1.4410 (2507) (Source : Aquatech)



Soudage mécanisé d'un oléoduc de grand diamètre en acier duplex (Source : Arco Exploration and Production Technology)

Métaux d'apport

La plupart des métaux d'apport pour le soudage des aciers inoxydables duplex sont décrits comme « assortis » (comparables au métal de base) ; en fait, par rapport au métal corroyé de base, ils sont habituellement suralliés en nickel (environ 2–4 % de nickel en plus), tandis que leur teneur en azote est généralement légèrement inférieure à celle du métal de base. Il est généralement admis que les aciers duplex d'apport fortement alliés conviennent pour le soudage des aciers duplex faiblement alliés. Les métaux d'apport de compositions assorties ont été décrits comme donnant des résultats acceptables pour le soudage des aciers duplex à des aciers austénitiques, des aciers au carbone ou des aciers faiblement alliés.

Protection

Dans le soudage TIG comme dans tous les procédés de soudage sous protection gazeuse, il est essentiel que le bain de soudure soit protégé de l'oxydation atmosphérique et de la contamination. Très généralement, cette protection est obtenue avec un gaz inerte, en l'occurrence de l'argon qualité soudage, sec, avec une pureté de 99,95 % minimum. Il est important que le circuit du gaz soit propre, sec et exempt de fuites et que le débit soit réglé de manière à fournir une protection correcte tout en évitant les phénomènes de turbulence et d'aspiration d'air. L'écoulement du gaz doit être lancé plusieurs secondes avant l'amorçage de l'arc (prégaz) et il doit être maintenu plusieurs secondes après l'extinction de celui-ci (postgaz). L'idéal est de le maintenir suffisamment longtemps pour que la soudure et la ZAT se refroidissent au-dessous de la plage des températures d'oxydation de l'acier inoxydable. Les débits suggérés pour la protection de

l'électrode sont de 12–18 l/min (0,4–0,6 cfm) lorsqu'on utilise un diffuseur à tamis et de moitié ces valeurs lorsqu'on utilise une buse courante.

La protection envers (également de l'argon pur) dépend du volume de la racine. Le débit doit en tout cas être suffisant pour assurer une purge complète de l'air et une protection totale de la soudure, indiquée par l'absence de coloration thermique. L'argon étant plus lourd que l'air, l'alimentation doit se faire du bas vers le haut du volume, en purgeant avec au moins sept fois le volume.

Des soudures satisfaisantes ont été obtenues avec de l'argon pur, mais des améliorations sont encore envisageables. L'addition d'azote sec à hauteur de 3 % facilitera la conservation de l'azote dans le métal déposé, en particulier dans le cas des aciers duplex les plus fortement alliés. L'addition d'azote s'est avérée augmenter l'usure des électrodes, l'addition d'hélium neutralisant partiellement cet effet.

Les additions d'oxygène et de dioxyde de carbone au gaz de protection sont à éviter : elles réduiront la résistance à la corrosion des soudures. En raison du risque de fragilisation des aciers duplex par l'hydrogène – fissuration de la phase ferritique induite par l'hydrogène –, l'utilisation d'hydrogène dans le gaz de protection (endroit et envers) est proscrite.

Le système de distribution de gaz et le système de refroidissement à l'eau, lorsque la torche en est équipée, doivent être régulièrement inspectés afin de s'assurer que la nature sèche et propre du gaz est préservée.

Conditions opératoires et paramètres d'exécution

Dans le cas des aciers inoxydables duplex, une préparation soignée et homogène des bords (alignement, talon, écartement) est particulièrement importante. En effet, si les aciers austénitiques supportent que l'on joue sur les conditions opératoires pour corriger les insuffisances de la préparation, on risque, dans le cas des aciers duplex, un maintien en température excessif. On recommande par ailleurs d'éviter dans la mesure du possible les supports envers en cuivre, les aciers duplex étant sensibles à la contamination superficielle par le cuivre.

Tous les coups d'arc en dehors de la zone de soudage créeront localement des points de soudure autogène avec des vitesses de trempe très élevées, résultant localement en une teneur en ferrite élevée et une perte éventuelle de résistance à la corrosion en ces points. Pour éviter ce problème, l'amorçage de l'arc doit se faire dans le joint lui-même.

Le pointage doit être réalisé sous protection gazeuse complète. Les points de soudure ne doivent pas se situer au départ de la passe de fond. Pour éviter la fissuration de celle-ci du fait des soudures de pointage, l'idéal consiste à interrompre la passe de fond et à supprimer le point de soudure par meulage, ou bien à meuler partiellement le point de soudure avant de procéder à la passe de fond.



Citerne à bitume en acier duplex lean (Source : Outokumpu)

L'écartement des bords doit être soigneusement maintenu pour assurer un apport thermique et une dilution homogènes sur toute la passe de fond. L'origine et la fin de la passe doivent être meulées avant le démarrage des passes de remplissage. Entre les passes, on laissera la pièce refroidir au-dessous de 150 °C (300 °F) pour les aciers duplex standard et au-dessous de 100 °C (210 °F) pour les superduplex de manière à assurer un refroidissement approprié de la ZAT lors des passes ultérieures.

Le métal d'apport le plus communément utilisé pour le soudage TIG des aciers duplex, est le métal assorti, c'est-à-dire le métal de base, légèrement surallié en nickel. Les aciers duplex les plus fortement alliés, superduplex par exemple, ont été employés avec succès pour le soudage de l'acier EN 1.4462 (2205). Les diamètres de fils couramment utilisés sont 1,6 mm, 2,4 mm et 3,2 mm (1/16, 3/32 et 1/8 in). Le fil d'apport doit être propre et sec et doit être stocké dans un récipient fermé jusqu'à l'utilisation. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque le soudage est réalisé à plat. La torche doit être maintenue aussi près que possible de la verticale afin de réduire au maximum l'aspiration d'air dans le gaz de protection.

On jouit d'une grande liberté de choix en matière d'apport thermique, correspondant à un large éventail d'épaisseurs et de conceptions de joints. L'apport se situe généralement dans la plage 0,5–2,5 kJ/mm (15–65 kJ/in) et se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Apport thermique (kJ/mm)} = (V \times A) / (S \times 1000)$$

où V = tension (volts)
A = intensité (ampères)
S = vitesse d'avance (mm/s)

ou bien

$$\text{Apport thermique (kJ/in)} = (V \times A \times 6) / (S \times 100)$$

où V = tension (volts)
A = intensité (ampères)
S = vitesse d'avance (in/min)

Recommandations générales en matière d'apport thermique :

EN 1.4362 (2304)*	0,5–2,0 kJ/mm (15–50 kJ/in)
EN 1.4462 (2205)	0,5–2,5 kJ/mm (15–65 kJ/in)
EN 1.4410 (2507)	0,3–1,5 kJ/mm (8–38 kJ/in)

(* ou lean duplex)

Lorsqu'il est réalisé avec une bonne protection et une gestion correcte du temps de maintien en température, le soudage TIG fournit une soudure présentant une bonne ténacité et une bonne résistance à la corrosion, et il peut être utilisé dans une grande variété de situations. Le procédé est souvent employé en complément d'autres procédés, utilisés à titre principal pour le soudage de constructions de grandes dimensions. Il est important que les modes opératoires du soudage TIG soient qualifiés pour la variété de situations dans lesquelles il est susceptible d'être utilisé.

12.3.2 Soudage MIG avec fil fusible et gaz inerte

Le soudage MIG avec fil fusible et gaz inerte (Gas Metal Arc Welding - GMAW) est particulièrement utile pour de longs cordons de soudure nécessitant le dépôt de volumes relativement importants de métal d'apport dans des conditions économiques. Il peut être automatisé pour les géométries simples. Il est souvent employé pour les cordons de soudure de grande longueur et est alors complété par des soudures TIG là où la dextérité s'impose, pour des opérations de finissage complexes.

Équipement

Le soudage MIG exige un équipement spécialisé comprenant une alimentation en tension constante avec possibilité de réglage de la pente de montée du courant et de l'inductance ou possibilité de courant d'arc pulsé. Le soudage MIG doit être effectué en courant continu en polarité inverse (DCRP), pôle positif à l'électrode. Trois modes de transfert du métal sont possibles.

Transfert par court-circuit (fonctionnement en arc court)

Ce mode, qui nécessite un réglage séparé de la pente et de l'inductance secondaire, est utile pour des matériaux jusqu'à environ 3 mm (1/8 in) d'épaisseur. Il conduit à l'apport thermique le plus faible pour le soudage MIG et est particulièrement utile pour les profils minces, pour lesquels il y a un risque de déformation en cas d'apport thermique plus important. Il peut être employé pour le soudage hors position.

Transfert en régime pulsé

Ce mode nécessite deux sources d'énergie pour fournir les deux sorties, la commutation des sources fournissant le régime pulsé. Le transfert de métal est important pendant la phase de pulvérisation mais faible dans la phase globulaire. Cette combinaison présente l'avantage de taux de dépôt élevés, tout en conservant un apport thermique limité.

Transfert par pulvérisation (fonctionnement stationnaire)

Ce mode fournit des taux de dépôt élevés et un arc stable, mais il s'accompagne aussi d'un apport thermique élevé. Il est généralement limité au soudage à plat. Il est économique lorsqu'on réalise de longs cordons droits avec des largeurs de soudure modérées.

Métaux d'apport

Le soudage MIG utilise une électrode consommable sous forme d'un fil continu qui est entraîné au travers de la torche par un dispositif d'alimentation automatique. Les métaux d'apport pour le soudage des aciers duplex sont des alliages de composition comparable à celle du métal de base « assortis », suralliés en nickel, de manière à obtenir l'équilibre des phases souhaité et les propriétés à l'état brut de soudage attendues.

Protection gazeuse

Le choix du gaz de protection pour le soudage MIG est légèrement plus complexe que pour le soudage TIG. Il varie en grande partie selon que l'on a recours à des mélanges achetés ou que l'on peut faire ses propres mélanges sur place. La protection gazeuse pour le soudage MIG va de l'argon pur à des mélanges d'environ 80 % d'argon avec de l'hélium, de l'azote et de l'oxygène, choisis pour augmenter la soudabilité et les propriétés finales de la construction soudée. Les débits dépendent du mode de transfert, de la vitesse d'avance et du diamètre du fil, mais se situent habituellement dans la gamme 12–16 l/min (0,4–0,6 cfm) pour des fils de 1 mm à 1,6 mm (0,035–0,063 in) de diamètre. Un stickout excessif doit être évité afin de permettre le maintien de la protection pendant le soudage. Comme cela a déjà été noté pour le soudage TIG, l'intégrité du système de distribution du gaz est essentielle et des précautions doivent être prises pour éviter l'entraînement d'air à l'intérieur de la protection. La soudure étant faite sur de grandes longueurs, il est important de bien protéger le joint des courants d'air pour maintenir la qualité des soudures. L'hydrogène ne doit pas être utilisé pour la protection, ni à l'endroit ni à l'envers, en raison du risque de fragilisation (de

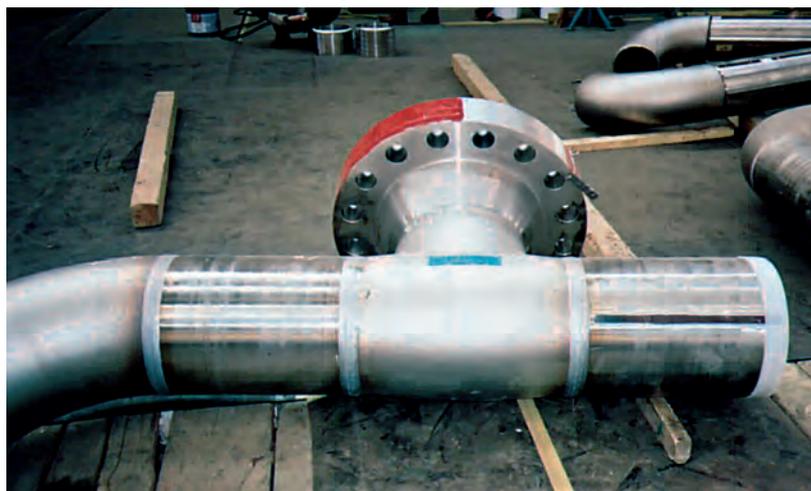
la phase ferritique des aciers duplex liée à l'hydrogène).

Conditions opératoires et paramètres d'exécution

Le Tableau 16 récapitule les paramètres de soudage usuels dans le cas du transfert par court-circuit et dans le cas du transfert par pulvérisation.

Comme avec le soudage TIG des aciers duplex, le soudage MIG exige une préparation soignée et homogène des bords (alignement, talon, écartement). Il convient, dans la mesure du possible, d'éviter les supports envers en cuivre, les aciers duplex étant sensibles à la contamination superficielle par le cuivre. En outre, les supports en cuivre sont susceptibles d'entraîner une trempe trop rapide dans certains cas.

Tous les coups d'arc en dehors de la zone de soudage créeront localement des points de soudure autogène, avec des vitesses de trempe très élevées, résultant localement dans une teneur en ferrite élevée et une perte éventuelle de résistance à la corrosion en ces points. Pour éviter ce problème, l'amorçage de l'arc doit se faire dans le joint lui-même. Tous les coups d'arc en dehors de la zone de soudure doivent être supprimés par un meulage fin.



Té avec bride, acier EN 1.4462 (2205) (Source : Arco Exploration and Production Technology)

Tableau 16 : Paramètres usuels pour le soudage MIG des aciers duplex, pour différents diamètres de fil. Cas du transfert par court-circuit et du transfert par pulvérisation (Source : Avesta Welding)

Transfert par court-circuit			
Diamètre du fil		Intensité	Tension
mm	pouce	A	V
1,0	0,035	90–120	19–21
1,2	0,045	110–140	20–22
Transfert par pulvérisation			
1,0	0,035	170–200	25–28
1,2	0,045	210–280	26–29
1,6	0,063	270–330	27–30



Soudage mécanisé de tubes d'oléoducs en acier inoxydable duplex de grand diamètre dans le nord de l'Alaska (Source : Arco Exploration and Production Technology)

Le pointage doit être réalisé sous protection gazeuse complète. Les points de soudure ne doivent pas se situer au départ de la passe de fond. Pour éviter la fissuration de celle-ci du fait des soudures de pointage, l'idéal consiste à interrompre la passe de fond et à supprimer le point de soudure par meulage, ou bien à meuler partiellement le point de soudure avant de procéder à la passe de fond. L'écartement des bords doit être soigneusement maintenu pour assurer un apport thermique et une dilution homogènes sur toute la passe de fond. L'origine et la fin de la passe doivent être meulées avant le démarrage des passes de remplissage. Entre les passes, on laissera la pièce refroidir au-dessous de 150 °C (300 °F) afin d'assurer un refroidissement approprié de la ZAT lors des passes ultérieures.

On utilise couramment des fils de 1,6 mm, 2,4 mm et 3,2 mm de diamètre (1/16, 3/32 et 1/8 in). Le fil d'apport doit être propre et sec et doit être stocké dans un récipient fermé jusqu'à l'utilisation. Le tube guide-fil doit être maintenu propre et sec. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque le soudage est réalisé à plat. La torche doit être maintenue aussi près que possible de la verticale afin de réduire au maximum l'aspiration d'air dans le gaz de protection.

12.3.3 Soudage à l'arc avec fil fourré

Le soudage à l'arc avec fil fourré (Flux Core wire arc Welding – FCW) est l'un des derniers développements disponibles sur le marché pour les aciers inoxydables duplex. Son succès démontre jusqu'où et avec quelle rapidité la technologie des aciers duplex s'est développée. Dans le soudage avec fil fourré, le fil est entraîné automatiquement au travers de la torche, par un système identique à celui utilisé habituellement

pour le soudage MIG. Le flux en poudre à l'intérieur du fil fournit une partie des éléments d'alliage du métal d'apport ainsi que le laitier qui protège la soudure de l'atmosphère, complétant la protection gazeuse fournie par la torche pour protéger la ZAT. Le soudage avec fil fourré est économique parce qu'il assure des taux de dépôt élevés et qu'il convient pour la soudure hors position et un large éventail d'épaisseurs.

Équipement

Le soudage à l'arc avec fil fourré est effectué avec le même équipement que pour le soudage MIG.

Métaux d'apport

Le flux solide du fil tendant à produire des soudures de ténacité légèrement réduite, résultant probablement de la teneur en oxygène supérieure du métal fondu, le métal d'apport est surallié en nickel. Ainsi, le métal fondu est plus austénitique que le métal de base, pratiquement à l'équilibre. La composition des flux et la production des fils fourrés étant propres à chaque fournisseur, il peut y avoir des différences significatives entre les différents produits d'apport. Il est important, pour les soudures en production, d'utiliser des fils fourrés de même origine que ceux utilisés pour la qualification des modes opératoires, de manière à éviter les écarts au niveau de la production.

Protection gazeuse

Les gaz de protection les plus généralement utilisés pour le soudage avec fil fourré sont un mélange de 80 % d'argon et 20 % de dioxyde de carbone pour les soudures à plat et 100 % de dioxyde de carbone pour les soudures verticales. Le débit est, dans un cas comme dans l'autre, de 20–25 l/min (0,7–0,9 cfm). Il est important de maîtriser le stick out afin de limiter la reprise de carbone, particulièrement lorsque la protection se fait avec 100 % de dioxyde de carbone.

Conditions opératoires et paramètres d'exécution

Pour un fil de 1,2 mm (0,045 in) de diamètre, l'intensité du courant et la tension sont habituellement réglés à 150–200 A et 22–38 V pour le soudage horizontal et à 60–110 A et 20–24 V pour le soudage vertical. Les recommandations en matière de techniques opératoires sont par ailleurs les mêmes pour le soudage avec fil fourré que pour le soudage MIG.

12.3.4 Soudage à l'arc à l'électrode enrobée

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (Shielded Metal Arc Welding – SMAW), aussi appelé soudage à la baguette, est une méthode universelle, qui convient pour souder des géométries complexes dans des positions ou avec des possibilités de protection relativement difficiles. Il est possible de recourir au soudage à l'électrode enrobée pour des constructions entières, notamment des constructions complexes de petites dimensions, mais ce procédé est le plus souvent employé en combinaison avec des procédés plus économiques pour les grandes constructions.

Équipement

Le soudage à l'électrode enrobée nécessite une source de courant continu. Il est réalisé en polarité inverse, pôle positif à l'électrode.

Métaux d'apport

L'électrode est constituée d'une âme consommable et d'un enrobage constituant le flux. Celui-ci, qui peut ou non contenir des éléments d'alliage supplémentaires qui pénétreront dans la soudure, est un mélange complexe, propre à chaque fabricant. Il assure la stabilité de l'arc, protège le métal pendant le transfert et protège la soudure de l'atmosphère pendant et après la solidification. Étant donné que chaque fabricant d'électrode a son propre enrobage, il peut y avoir des différences substantielles entre des produits théoriquement semblables, mais de fournisseurs différents. Les enrobages peuvent renforcer la ténacité de la soudure ou améliorer son aspect physique, ils peuvent aussi être spécialement conçus pour une performance maximale dans une position spécifique – soudage à plat, soudage hors position, soudage vertical.

Les enrobages des électrodes sont hygroscopiques. La présence d'humidité dégradera notablement leurs performances de sorte que les électrodes doivent être maintenues dans leur emballage hermétique, scellé en usine, jusqu'au moment de leur utilisation. Une fois l'emballage ouvert, les électrodes doivent être étuvées à 95 °C (200 °F) ou plus afin d'empêcher l'accumulation d'humidité qui pourrait conduire à la porosité ou à la fissuration des soudures. Le flux augmentant la teneur en oxygène de la soudure et réduisant, de ce fait, la ténacité, il est courant d'équilibrer les électrodes près du niveau maximal d'austénite permettant de conserver l'effet bénéfique de la structure duplex. La ténacité de la soudure est nettement inférieure à celle du métal de base, mais généralement largement supérieure aux niveaux considérés comme appropriés pour les aciers au carbone et les aciers alliés. Une erreur qui a parfois été commise dans la qualification des soudures à l'électrode enrobée est l'utilisation de l'essai ASTM A 923 sans ajustement approprié du critère d'acceptation. La résilience inférieure observée pour les soudures à l'électrode enrobée n'indique pas la présence de phases intermétalliques, elle doit être attribuée à l'oxygène du flux. L'exigence d'une résilience minimale de 54 J/40 ft-lb à 40 °C/°F pour le métal de base mène à une disqualification injustifiée de ce procédé pourtant hautement polyvalent qui, dans la pratique, a été employé pendant des années avec d'excellents résultats. L'ASTM A 923 spécifie une résilience minimale de 34 J/ 25 ft-lb pour le métal d'apport et de 54 J/ 40 ft-lb pour la ZAT.

Protection gazeuse

La protection gazeuse n'intervient habituellement pas dans le cas du soudage à l'électrode enrobée puisque cette méthode fait appel au flux et aux gaz produits par l'enrobage pour réaliser la protection.

Conditions opératoires et paramètres d'exécution

Les paramètres du soudage à l'électrode enrobée sont en grande partie fonction du diamètre de l'électrode, comme indiqué dans le Tableau 17.

Pour maximiser la protection fournie par le flux, le soudeur doit conserver un arc aussi court que possible. Une distance excessive (arc long) peut entraîner une porosité de la soudure, une oxydation excessive, des apports thermiques excessifs et une réduction des propriétés mécaniques.

La passe de fond doit être effectuée avec une baguette de faible diamètre, les plus grosses étant utilisées pour les passes de remplissage. L'arc doit toujours être amorcé dans la zone de soudage elle-même. Les coups d'arc et projections doivent être éliminés par meulage fin.

Le soudage à l'électrode enrobée ne doit pas être employé pour des aciers inoxydables duplex de moins de 2 mm (0,08 in) d'épaisseur. La pièce doit si possible être horizontale, mais on peut choisir les électrodes enrobées pour souder dans pratiquement n'importe quelle position. L'électrode doit être tenue avec un angle de 20 °, en tirant (porte-électrode incliné dans le sens de l'avancement). Le métal doit être déposé sous forme d'un cordon continu de gouttes, rectiligne, en limitant au maximum l'ondulation. Le courant doit être juste suffisant pour former un arc régulier et une bonne fusion de la soudure et du métal de base.

Tableau 17 : Paramètres usuels du soudage des aciers duplex à l'arc à électrode enrobée pour différents diamètres d'électrodes (Source : Outokumpu)

Diamètre d'électrode			
Diamètre du fil		Intensité	Tension
mm	pouce	A	V
2,0	0,078	35–60	22–28
2,5	0,094	60–80	22–28
3,25	0,125	80–120	22–28
4,0	0,156	100–160	22–28



Manifold en EN 1.4462 (2205) (Source : Arco Exploration and Production Technology)

12.3.5 Soudage à l'arc submergé

Le soudage à l'arc submergé (Submerged Arc Welding – SAW), ou soudage à l'arc sous flux en poudre, permet le dépôt de cordons de soudure relativement larges avec un temps total de maintien en température pour la ZAT inférieur à ce qui serait possible avec un dépôt moindre par passe et un nombre de passes élevé. En raison de la solidification de la ferrite et de la transformation duplex du métal fondu, les aciers duplex peuvent être soudés à l'arc submergé avec un risque minimal de fissuration à chaud. Il est toutefois nécessaire de procéder à quelques ajustements par rapport aux aciers austénitiques (conception du joint ou paramètres de soudage) afin d'obtenir des soudures à pleine pénétration. Les soudures à l'arc submergé réalisées à des vitesses d'avance très élevées, combinées à des conceptions défavorables de la gorge, peuvent entraîner des fissures axiales ; l'abaissement de la vitesse d'avance suffit normalement à résoudre ce problème. Pour de grandes constructions et pour des cordons rectilignes de grande longueur, le soudage à l'arc submergé constitue une approche économique et techniquement satisfaisante. Le procédé est couramment utilisé pour la fabrication des tubes en acier duplex de forte épaisseur.

Métaux d'apport et protection

Pour le soudage à l'arc submergé, le métal d'apport assorti habituel convient. Il est néanmoins important de choisir un flux correct, afin d'obtenir les propriétés désirées. Il a été signalé que les flux fortement basiques donnaient la meilleure ténacité dans le cas des aciers duplex.

Conditions opératoires et paramètres d'exécution

Les paramètres typiques pour le soudage à l'arc submergé des aciers duplex sont récapitulés dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Paramètres usuels du soudage à l'arc submergé des aciers duplex, pour différents diamètres de fils (Source : Outokumpu)

Diamètre du fil		Intensité	Tension
mm	pouce	A	V
2,5	0,094	250–450	28–32
3,25	0,125	300–500	29–34
4,0	0,156	400–600	30–35
5,0	0,203	500–700	30–35

Note : La vitesse d'avance usuelle est de 30–60 cm/minute

12.3.6 Soudage par faisceau d'électrons et soudage laser

Le retour d'expérience de l'utilisation du soudage par faisceau d'électrons et du soudage laser des aciers duplex est positif. Ces procédés produisent des ZAT de dimensions très limitées et s'accompagnent d'un refroidissement rapide qui empêche la formation de phases intermétalliques. Cette vitesse de refroidissement élevée peut cependant entraîner une formation excessive de ferrite dans la soudure de sorte que la qualification des modes opératoires est essentielle. Un recuit de mise en solution après le soudage réduit le niveau de ferrite et améliore le rapport des phases austénite/ferrite dans la soudure.

12.3.7 Soudage par résistance

Le soudage par résistance à impulsion unique, utilisé pour la réalisation de points de soudure, entraîne une trempe très rapide de la ZAT, plus rapide pour les aciers duplex que pour les aciers austénitiques en raison de la conductivité thermique supérieure des aciers duplex. Une mince couche de métal immédiatement adjacente à la ligne de fusion atteint alors la plage de températures dans laquelle la structure duplex est entièrement convertie en ferrite. Le refroidissement est si rapide que même les aciers duplex à teneur élevée en azote sont peu susceptibles de reformer de l'austénite dans cette région. Il est alors possible d'avoir un métal de base avec une ténacité élevée et une soudure avec une couche intermédiaire continue de ferrite de ténacité limitée.

L'utilisation d'une machine à souder programmable permet d'établir un cycle de soudage à deux impulsions, qui ralentira suffisamment le refroidissement pour empêcher cette couche continue de ferrite. Là aussi, il peut être nécessaire de qualifier les modes opératoires pour différentes épaisseurs de section.

Une machine à souder par résistance à la molette risque moins d'être confrontée à ce problème ; par ailleurs, il est très improbable que les durées d'exposition seront suffisamment longues pour la formation de phases intermétalliques. Néanmoins, la qualification des modes opératoires doit s'intéresser en particulier au risque d'apparition de ferrite en excès.

13 Autres techniques d'assemblage

Les techniques d'assemblage autres que le soudage (pour lequel le métal de base est fondu pour produire le joint) ont pour avantage de réduire le gauchissement au minimum et de limiter très fortement les contraintes résiduelles. Les joints peuvent être étanches et relativement résistants, sans toutefois atteindre tout à fait les propriétés des joints soudés, pour lesquels la résistance mécanique et la résistance à la corrosion du métal déposé sont pratiquement aussi élevées que celles du métal de base. Ceci constitue une considération importante pour les aciers duplex, qui sont supérieurs aux aciers austénitiques de la série AISI 300 en termes de résistance mécanique autant que de résistance à la corrosion.

13.1 Préparation des joints

Quelles que soient les techniques d'assemblage, il est très important de procéder au préalable à un nettoyage soigné. Les surfaces doivent être exemptes d'huiles, de graisses, de salissures, de poussière ou de traces de doigts, que l'on éliminera à l'aide d'un dissolvant. Les huiles et les graisses peuvent en effet empêcher l'élimination de la couche d'oxyde par le flux dans les opérations de brasage, tandis que les contaminants superficiels non adhérents réduisent la portée effective. Souvent, une surface légèrement rugueuse produira un meilleur joint qu'une surface lisse. Un dépolissage avec un abrasif fin pourra parfois contribuer à augmenter la mouillabilité d'une surface, paramètre critique pour une bonne adhérence.

13.2 Collage

Une grande variété d'adhésifs commerciaux est disponible pour le collage des surfaces métalliques. Les aciers duplex sont traités comme n'importe quel autre métal pour la réalisation des assemblages collés. Les fabricants d'adhésifs peuvent aider au choix d'un produit approprié pour une résistance du joint, une température de service et un milieu donnés.

13.3 Brasage tendre

Le brasage tendre se distingue du brasage fort par la température de fusion du métal d'apport. Dans le cas du brasage tendre, elle est habituellement inférieure à 450 °C (840 °F). Les assemblages par



Evaporateur à film tombant, en acier inoxydable EN 1.4410 (2507) (Source : Gary Carinci, TMR Stainless)

brasage tendre ne sont généralement pas aussi résistants que les assemblages par brasage fort, et leur température de service est inférieure. Les matériaux d'apport usuels sont les alliages étain-plomb, étain-antimoine, étain-argent et étain-plomb-bismuth. Ces métaux d'apport à bas point de fusion produisent des joints de résistance mécanique et de résistance à la corrosion différentes, avec des couleurs différentes.

Un bon assemblage par brasage tendre nécessite l'élimination préalable de la couche superficielle d'oxydes au moyen d'un flux. La grande stabilité de la couche protectrice d'oxydes des aciers inoxydables et tout particulièrement des aciers duplex alliés au molybdène peut rendre un fluxage approprié très difficile. Les flux acides usuels sont susceptibles de contenir des chlorures. Dans ce cas, le brasage doit être suivi aussitôt d'un lavage à l'eau et/ou avec un produit de neutralisation. Une élimination incomplète du flux a toutes les chances d'entraîner une corrosion par piqûres, peut-être même avant la mise en service de l'équipement.

13.4 Brasage fort

Les métaux d'apport du brasage fort ont un point de fusion supérieur à 450 °C (840 °F). Ils sont de trois types : alliages d'argent, alliages de nickel et alliages de cuivre. Les alliages d'argent ont un point de fusion relativement bas et sont brasés à 618–705 °C (1145–1300 °F), les alliages de cuivre sont brasés à 1100–1150 °C (2000–2100 °F), tandis que les alliages de nickel ont un point de fusion plus élevé, jusqu'à 1175 °C (2150 °F). Les joints brasés au nickel peuvent résister à une température de service plus élevée que les joints brasés au cuivre ou à l'argent.

Dans le cas des aciers duplex, la plage de température 705–980 °C (1300–1800 °F) doit être évitée. Il est par conséquent important de braser à une température supérieure à 1040 °C (1900 °F) ou à une température inférieure à 705 °C (1300 °F). Les joints brasés peuvent être trempés depuis des températures de brasage supérieures à 1040 °C (1900 °F).

Il convient de choisir un produit d'apport approprié en fonction de la résistance à la corrosion, de la température de service et de la résistance mécanique du joint souhaitées. Les alliages à base de nickel contiennent jusqu'à 25 % de chrome, ce qui les rend dans une certaine mesure résistants à la corrosion, mais moins que l'acier duplex EN 1.4462 (2205).

Des difficultés ont été signalées concernant le brasage fort des aciers inoxydables contenant de l'azote. Ceci pourrait concerner les aciers duplex de seconde génération, qui contiennent des niveaux d'azote importants. On dispose de peu de données à ce sujet, de sorte qu'il revient au constructeur de faire des essais afin de trouver les paramètres de brasage idéaux.

Comme pour le brasage tendre, la couche d'oxyde doit être éliminée avant et pendant l'opération de brasage fort, de manière à créer un joint sain. Là aussi, ceci est obtenu avec un flux qui doit être éliminé après le brasage. La procédure est semblable au nettoyage après brasage tendre et consiste à frotter à l'eau chaude ou avec un produit chimique neutralisant.



Élément d'une installation de désulfuration des fumées réalisé en acier inoxydable EN 1.4462 (2205) (Source : Aperam)

14 Nettoyage post-fabrication

Le nettoyage post-fabrication des aciers duplex n'est pas différent du nettoyage exigé pour les autres aciers inoxydables. Ce nettoyage est très important, aussi important que la maîtrise de la température interpassage ou l'utilisation d'une protection gazeuse pendant le soudage. La défaillance d'un acier inoxydable qui n'a pas été correctement nettoyé après fabrication peut intervenir à des températures beaucoup plus basses ou dans un environnement beaucoup moins agressif que celle du métal de base. Ceci signifie que le surcoût que représente le choix d'un matériau plus résistant à la corrosion aura été engagé pour rien, sauf si la construction garantit le maintien ou la restauration d'une surface optimale. Les projections de soudure, les colorations dues au soudage, les traces de crayon gras, les coups d'arc, les morsures et les caniveaux peuvent constituer des cavernes dans un milieu aqueux. Ils peuvent également avoir un potentiel différent de celui de la surface métallique, entraînant ainsi des réactions galvaniques. Il est donc important de supprimer ces ruptures du film passif protecteur. La Figure 18 montre un récapitulatif des ruptures du film qui peuvent se produire au cours de la fabrication et qui doivent être éliminées avant la mise en service de tout acier inoxydable.

14.1 Traces de crayon gras, peintures, salissures, huiles

Tous ces contaminants superficiels peuvent agir comme des cavernes et constituer des emplacements où s'amorce une corrosion par piqûres ou une corrosion cavernreuse de l'acier inoxydable. Ils peuvent également entraîner une contamination carbonée. Si l'on vient à souder, il peut y avoir précipitation de carbures ; l'acier peut alors être sensibilisé, avec apparition d'une corrosion intergranulaire en service. Toute contamination doit donc être éliminée au moyen d'un dissolvant.

14.2 Contamination ferreuse

La contamination ferreuse (fer libre incrusté) provient de l'utilisation, pour la fabrication ou la manutention de l'acier inoxydable, d'outils en acier au carbone. L'utilisation de tels outils sur des aciers inoxydables ou bien le travail d'acier au carbone à proximité du lieu où est stocké l'acier inoxydable peuvent entraîner le transfert de particules de fer à la surface de ce dernier. En présence d'humidité, ce fer rouille et peut provoquer l'amorçage d'une corrosion superficielle de l'acier inoxydable. Une solution consiste à éviter tout contact entre acier inoxydable et acier au carbone et à utiliser exclusivement des outils, brosses et

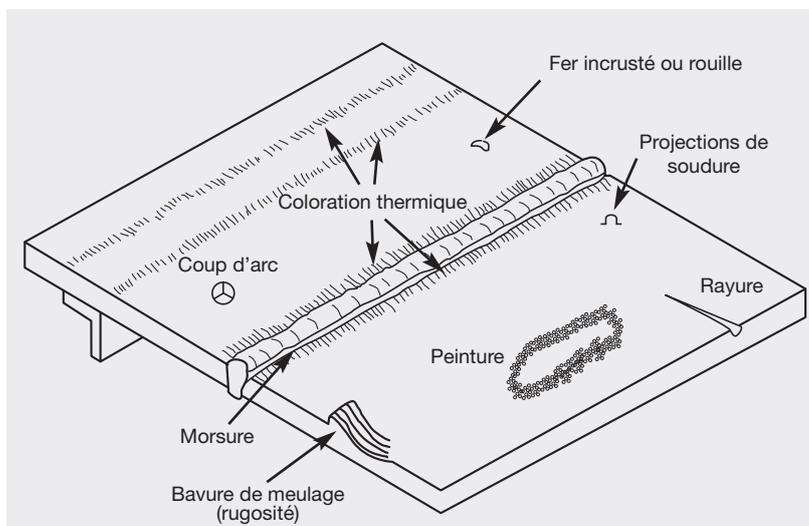


Figure 18 : Défauts et états de surface typiques possibles (Source : Nickel Institute Publication 10 026)

serre-joints en acier inoxydable ainsi que des meules neuves et propres. Les outils sont souvent identifiés par un code couleur en atelier.

Souvent, toutefois, il est impossible et inéconomique d'éviter complètement l'utilisation d'un outillage en acier au carbone et d'empêcher la déposition de particules de fer provenant de l'environnement de l'atelier. L'existence d'un transfert de fer est alors admise mais on veillera à l'éliminer avant la mise en service de l'acier inoxydable. Le fer peut être éliminé



Fer incrusté dans une pièce profilée à partir d'une tôle d'acier duplex (Source : Gary Carinci, TMR Stainless)

par nettoyage mécanique, nettoyage chimique, ou une combinaison des deux. La meilleure méthode dépend de la taille et de la forme de la pièce, de l'usage prévu et d'un certain nombre de considérations pratiques, notamment concernant l'élimination des déchets du nettoyage. Le traitement chimique à l'acide nitrique, qui dissout le fer libre à la surface de l'acier inoxydable sans attaquer ce dernier ni le film passif protecteur, est couramment utilisé pour le nettoyage. Mais il existe de nombreuses autres approches en matière de nettoyage chimique, à même d'atteindre les résultats attendus. Les méthodes de nettoyage sont abordées en détail dans l'ASTM A 380⁷. Il est particulièrement important que l'utilisateur soit familier des questions de sécurité abordées dans cette norme.

L'ASTM A 967⁸ (qui remplace la norme fédérale américaine QQP-35c) fournit des informations quant au choix d'un essai approprié pour démontrer l'efficacité du traitement de passivation de l'acier inoxydable. Cette norme laisse l'acheteur définir le niveau de passivation à atteindre, l'opérateur exécutant le traitement superficiel étant libre de choisir une méthode appropriée, à la fois économique et efficace.

14.3 Projections de soudure, colorations thermiques, incrustation de flux et de laitier, coups d'arc

Tous ces défauts, susceptibles de se produire pendant le soudage, peuvent se comporter comme des cavernes et être à l'origine d'une corrosion cavernueuse dans un milieu chloruré. Ils doivent donc être évités ou être éliminés après soudage. Les projections de soudure peuvent être évitées en employant un composé anti-adhérent (anti-gratons). Les colorations

thermiques entraînent une perte de résistance à la corrosion due à la destruction de la couche passive. Une coloration marquée ou un bleuissement doivent être évités par une protection gazeuse des soudures avec un gaz inerte à l'endroit et par une purge, également avec un gaz inerte, à l'envers. Souvent, cependant, la coloration ne peut être totalement évitée et doit être éliminée au cours du nettoyage qui suit le soudage. Les incrustations de flux et de laitier, de même que les coups d'arc, doivent également être éliminés avant la mise en service du matériel. Les projections de soudure, les colorations dues au soudage, les incrustations de flux ou de laitier, les coups d'arc, les morsures et les caniveaux peuvent tous être éliminés par un nettoyage mécanique tel que le meulage fin ou le brossage avec une brosse métallique en acier inoxydable (brossage manuel ou mécanique). Il est important d'utiliser une meule fine car les marques de meulage grossières peuvent elles aussi entraîner une corrosion en service, en permettant à des dépôts d'adhérer et à des cavernes de se former.

La caractéristique distinctive des aciers duplex est que la coloration thermique due au soudage tend à être particulièrement fine, adhérente, et plus résistante au nettoyage chimique que pour les aciers austénitiques de résistance à la corrosion comparable. Elle peut être éliminée par décapage acide, par exemple avec une solution à 20 % d'acide nitrique et 5 % d'acide fluorhydrique pour l'acier EN 1.4462 (2205) ; cette solution dissout les oxydes de chrome et attaque aussi l'acier inoxydable de sorte que la couche déchromée est enlevée. Comparables dans leurs effets, mais plus faciles à utiliser pour les pièces de grandes dimensions, les pâtes de décapage peuvent remplacer la solution acide. Il convient cependant de noter que la pâte produit, au rinçage, une solution qui n'est pas sans danger, imposant à l'utilisateur des procédures de sécurité, de manipulation et d'élimination appropriées. Selon la résistance à la corrosion de l'acier duplex, un acide plus ou moins agressif peut être nécessaire pour éliminer la coloration thermique.

Les travaux de recherche ont montré que la meilleure résistance à la corrosion après soudage est obtenue lorsqu'on fait suivre le nettoyage mécanique d'une passivation chimique.



Chimiquier avec cuves en EN 1.4462 (2205) (Source : Aperam)

7 ASTM A 380 standard practice for cleaning, descaling and passivation of stainless steel parts, equipment, and systems

8 ASTM A 967 standard specification for chemical passivation treatments for stainless steel parts

15 Applications des aciers inoxydables duplex

Désulfuration des fumées

L'avenir des centrales électriques au charbon est incertain au regard de l'agenda mondial en matière de qualité de l'air. Des réductions supplémentaires des émissions de SO₂ seront nécessaires, et la désulfuration des fumées constitue une des méthodes pour y parvenir. L'utilisation de suspensions de chaux ou de calcaire pour un traitement par voie humide du dioxyde de soufre contenu dans les fumées constitue une technologie mature, le principe ayant été appliqué aux systèmes de chaudières des centrales depuis les années 1970. Les laveurs modernes sont aujourd'hui capables d'éliminer plus de 90 % du SO₂ des gaz brûlés. Les unités modernes de désulfuration comportent plusieurs zones, à différentes températures, concentrations en chlorures et pH. Un acier inoxydable de type EN 1.4462 (2205) a été utilisé pour des applications de désulfuration en Europe et en Asie en raison de son coût plus faible et de sa meilleure résistance à la corrosion, comparé avec les aciers inoxydables austénitiques. L'utilisation de l'acier duplex a reçu récemment un accueil favorable en Amérique du Nord et cette nuance est devenue le choix le plus répandu pour les absorbeurs des installations de désulfuration, en raison de sa résistance mécanique élevée, de sa bonne résistance à la corrosion et de ses propriétés élevées de ténacité après soudage.

Dessalement

Le dessalement constitue l'une des applications les plus sévères pour les matériaux, en raison de l'environnement corrosif caractéristique du processus, avec à la fois une teneur élevée en chlorures et des températures élevées. L'histoire du dessalement est en grande partie une histoire du développement des matériaux ; en effet, pour que les projets de dessalement puissent être abordables, les clients cherchent un équilibre entre les exigences en matière de résistance à la corrosion et les exigences en matière de maîtrise des coûts d'investissement. A l'origine, les évaporateurs, dans les usines MSF-distillation à détentés étagées – comme dans les usines MED-distillation à multiples effets –, étaient fabriqués en acier doux. Puis on a revêtu les évaporateurs des installations MSF d'acier austénitique EN 1.4404 (AISI 316L) tandis que les chambres des installations MED étaient d'abord revêtues d'époxyde puis, à leur tour, d'acier inoxydable.

Les avantages de l'acier duplex pour cette application sont sa résistance mécanique élevée – double de celle des nuances austénitiques conventionnelles –, et sa grande résistance à la corrosion. Par conséquent, les évaporateurs en acier duplex peuvent être



Elément d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation à détentés étagées (MSF), aciers duplex EN 1.4162 (UNS S32101) et EN 1.4462 (2205) (Source : Outokumpu)

construits avec des tôles plus minces, exigeant moins de matière et moins de soudage. Les autres avantages sont une maintenance plus aisée et un impact environnemental global plus faible.

La percée de l'acier duplex en la matière s'est produite en 2003, lorsque la nuance EN 1.4462 (2205) a été choisie pour des évaporateurs entièrement en duplex destinés à l'usine MSF de Melittah et à l'usine MED de Zuara, en Libye. L'installation, avec une capacité de 4 MIGD (million imperial gallons per day), a été mise en service en 2004.

L'étape suivante dans l'évolution des aciers duplex pour les applications du dessalement a débuté en 2004 lorsque deux types d'acier duplex différents ont été utilisés dans les structures des évaporateurs : le EN 1.4462 (2205), hautement résistant à la corrosion, pour les parties exposées aux conditions les plus sévères, et le EN 1.4362 (2304) pour les parties exposées aux conditions les moins sévères.

Trois usines MSF ont été récemment construites selon ce concept, en combinant les nuances EN 1.4462 (2205) et EN 1.4162 (UNS S32101) : Taweelah B (Abu Dhabi, capacité 69,2 MIGD), Jebel Ali L2 (Dubai, 55 MIGD) et Ras Abu Fontas B2 (Qatar, 30 MIGD). Ce même concept combiné – acier EN 1.4362 (2304) et acier EN 1.4462 (2205) –, a été appliqué depuis 2003 dans des usines MED et tout récemment à la construction de la plus grande usine MED au monde, Al Hidd, au Bahreïn, avec une capacité de 60 MIGD.

Pétrole et gaz

L'acier duplex a joué un rôle déterminant dans l'industrie du pétrole et du gaz, en permettant de faire face à des conditions particulièrement sévères. Ceci s'explique non seulement par sa résistance mécanique et sa tenue générale à la corrosion, mais aussi plus précisément par le fait que sa résistance à la corrosion par piqûres et sa résistance à la corrosion caverneuse sont supérieures à celles des alliages austénitiques standard, avec un indice PREN souvent supérieur à 40.

Les principales applications des aciers duplex sont les conduites d'écoulement et autres tuyauteries en général, ainsi que les équipements tels que séparateurs, laveurs ou pompes. Dans les opérations offshore, les aciers duplex sont employés dans les tubes de production, les manifolds, les composants des arbres de Noël, les lignes de collecte et les oléoducs d'évacuation du pétrole et du gaz corrosifs. Les aciers superduplex (25 % de chrome) sont appréciés pour leur résistance mécanique, de sorte qu'ils sont souvent utilisés sous de multiples formes – barres, pièces forgées, pièces moulées, tôles, plaques, tubes, boulonnerie, par exemple. Les aciers superduplex présentent également une excellente résistance en fatigue et une excellente compatibilité galvanique vis-à-vis d'autres aciers inoxydables fortement alliés.

Les ombilicaux servent au contrôle des têtes de puits, au moyen de circuits hydrauliques ; ils peuvent également être employés pour l'injection de produits chimiques. Depuis la mise sur le marché des ombilicaux en acier, ce sont les aciers duplex qui ont été le plus couramment utilisés. On note, ces dernières années, une tendance à l'exploration de champs sous-marins toujours plus profonds, ce qui nécessite des liaisons ombilicales plus longues. L'augmentation de la résistance mécanique de l'acier permet de

réduire le poids des ombilicaux et ainsi d'augmenter les longueurs. La tendance est également à une utilisation des ombilicaux dans des eaux plus chaudes et au développement de concepts consistant à introduire un riser dans la liaison, ce qui accroît encore la demande en matière de résistance à la corrosion et de résistance mécanique. De nouveaux aciers inoxydables, hyperduplex, ont été développés à cet effet, avec une meilleure résistance à la corrosion et une meilleure résistance mécanique que les aciers inoxydables superduplex.

Agrocarburants

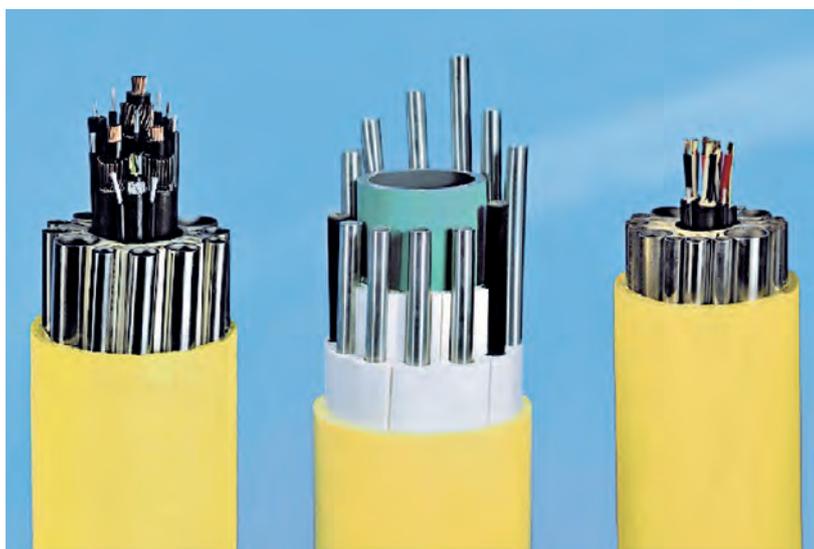
A terre, les agrocarburants, particulièrement l'éthanol, constituent un secteur dans lequel l'utilisation des nuances duplex se développe. L'acier inoxydable EN 1.4462 (2205) a été employé pour l'usine « biomass to liquid » NExBTL de Singapour, tandis que l'acier inoxydable EN 1.4162 (UNS S32101) a été choisi par le constructeur hollandais de cuves Oostwouder Tank-& Silobouw BV pour son installation de cuves pour Noba Vetveredeling BV dans un projet d'agrocarburants de grande ampleur dans le port d'Amsterdam. L'acier EN 1.4162 (UNS S32101) a également été spécifié pour les réservoirs et les tuyauteries de l'extension de l'usine d'éthanol d'Agroetanol sur l'île de Händelö en Suède. Les nuances duplex lean ont remplacé les aciers austénitiques de la série AISI 300 dans beaucoup d'applications faisant intervenir l'éthanol.

Industrie agroalimentaire

L'acier duplex lean fait également ses preuves dans l'industrie agroalimentaire. Le matériau est employé actuellement pour deux projets en Espagne, un entrepôt alimentaire et un entrepôt viticole. Dans le port de Barcelone, Emypro SA a construit des cuves pour le stockage de produits alimentaires entièrement en EN 1.4162 (UNS S32101), en remplacement des nuances EN 1.4301/1.4307 (AISI 304/304L). L'entrepôt viticole, construit par le constructeur de cuves espagnol Martinez Sole pour Garcia Carrión à Daimiel, dans le sud de l'Espagne, est le premier à employer des aciers duplex : l'acier inoxydable EN 1.4162 (UNS S32101) et la nuance EN 1.4362 (2304) ont été utilisés pour la construction du toit et des niveaux supérieurs de toutes les nouvelles cuves, comme alternative moins coûteuse aux EN 1.4301/1.4404 (AISI 304/316L).

Architecture

L'acier duplex continue à jouer un rôle important dans la construction des ouvrages d'art partout où la corrosion et un environnement salin se combinent avec la nécessité d'une portance élevée. Deux exemples récents, tous deux en Asie, sont le Stonecutters Bridge à Hong Kong et la passerelle piétonne de Marina Bay à Singapour, – connue sous le nom de « The Helix » –



Liaison ombilicale en acier EN 1.4410 (2507) pour des applications offshore de pétrole et de gaz (Source : Sandvik)



Stonecutters Bridge, Hong Kong (Source : Ove Arup & Partners)

qui emploient tous deux la nuance EN 1.4462 (2205). Le Stonecutters Bridge a utilisé 2000 tonnes de tôles et de tubes en acier duplex EN 1.4462 (2205) en 2006. Les segments du revêtement des pylônes ont été parachevés par un constructeur chinois, à partir de plaques spécialement conçues pour le projet : elles ont été polies et grenillées pour fournir un niveau de réflexion optimal, de jour comme de nuit.

La passerelle de Marina Bay (The Helix), quant à elle, utilise 570 tonnes d'acier duplex. D'une conception extraordinaire, l'ouvrage est constitué par deux éléments tubulaires en acier inoxydable, de forme hélicoïdale, semblables à la structure de l'ADN. C'est cette double hélice et les structures d'appui qui font appel à des tubes et tôles en duplex EN 1.4462 (2205). De nuit, les surfaces en acier inoxydable apportent leur contribution en réfléchissant un éclairage destiné à mettre en valeur la conception de l'ouvrage.



« The Helix », Singapour, avec une structure de support en acier duplex EN 1.4462 (2205) (Source : Financial Dynamics/C. F. Jones)

La plus grande toiture en acier inoxydable du monde, celle du nouvel aéroport international de Doha, au Qatar, est construite avec un acier duplex lean au molybdène (UNS S32003). Cette toiture ondulante constitue la particularité la plus saisissante du terminal. D'une surface d'environ 195 000 mètres carrés (2,1 millions de sq.ft), elle utilise environ 1600 tonnes (3,5 millions de livres) d'acier duplex. Le choix de la nuance devait tenir compte de plusieurs paramètres. Le plus important de ceux-ci était la grande proximité de l'aéroport avec la mer ; la toiture devait donc résister non seulement à la chaleur et à l'humidité caractéristiques du Moyen-Orient, mais aussi à la corrosion saline. D'autres paramètres sont intervenus dans le choix : le coût ainsi qu'un rapport résistance mécanique/poids favorable, qui ont placé l'acier inoxydable duplex devant les autres nuances.



Nouvel aéroport international de Doha, avec une toiture en acier duplex (Source : Qatar Airways)

Pour aller plus loin

Informations générales

P. Johansson, M. Liljas, A New Lean Duplex Stainless Steel for Construction Purposes, Proceedings of 4th European Stainless steel Conference Science and Market, Paris 2002.

M. Liljas, J.Y. Jonsson, S.Wessman, Stress Relief Treatment of 22Cr Duplex Stainless Steel EN 1.4462, Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2005

M. Liljas, 80 Years with Duplex Steel, a Historic Review and Prospects for the Future, Proceedings of 6th European Stainless Steel Conference Science and Market, Helsinki, Finland 2008

H. Liu, P.Johansson, M.Liljas , Structural Evolution of LDX 2101 During Isothermal Ageing at 600–850°C, Proceedings of 6th European Stainless Steel Conference Science and Market, Helsinki, Finland 2008

Z. Wei, J. Laizhu, H. Jincheng, S. Hongmei, Study of Mechanical and Corrosion Properties of a Fe-21.4Cr-6Mn-1.5Ni-0.24N-0.6Mo Duplex Stainless Steel, Materials Science and Engineering A, 2008, 497: 501–504

J. Charles, Why and Where Duplex Stainless Steels, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 29.

M.G. Mecozzi, M. Barteri, Effect of Alloying Elements and Impurity on Hot Ductility of 23% Cr 4% Ni Stainless Steel, 5th World Conference Duplex Stainless Steels, Conference Proceedings, KCI Publishing, 1997, p. 1011–1016.

J. Charles, Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 3 and p. 151.

F. Dupouiron, S. Faucheur, and G. Varvat, Fabrications of Process Equipment in Duplex Stainless Steels, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 621.

C. W. Kovach, High-Performance Stainless Steels, Nickel Development Institute Reference Book Series No 11021, Toronto, Canada, 2000

Métallurgie physique

R. Sanchez, I. Moreno, J. Amagro, J. Botella, Effects of Composition and Thermal History on the Phase Balance and Elements Distribution of Standard and Modified Duplex Stainless Steel, 4th Stainless Steel Science and Market Congress, Conference Proceedings, Paris 2002, p. 108–113.

J.-O. Nilsson, The Physical Metallurgy of Duplex Stainless Steels, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 73.

J.-O. Nilsson, The Use of Modern Physical Metallurgy in the Development and Characterization of Special Stainless Steels, Journal de Physique, 4, 1993, Vol. 3, Number 7/V1, p. C7-67–C76.

B. Josefsson, J.-O. Nilsson and A. Wilson, Phase Transformations in Duplex Steels and the Relation Between Continuous Cooling and Isothermal Heat Treatment, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 67.

Usinage

C. Bergqvist, J. Olsson, Machining in the New Duplex Grade LDX 2101-Easier Than Expected. Proceedings of Duplex 2007, Grado, Italy 2007.

B. Pellegrini, B.N. Di Caprio and R. Pacagnella, Tool Performance in Continuous Cutting of Duplex Stainless Steel, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 175.

C.G. Carlborg, Å. Nilsson and P-Å. Frandlind, Machinability of Duplex Stainless Steel, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 685.

Soudage

F. Hägg, M.Liljas, B.Holmberg, The welding consequences of replacing austenitic with duplex stainless steel. Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2007

C. Baxter, M.Young, Practical aspects for production welding and control of duplex stainless steel pressure and process plants. Proceedings of Duplex America, Houston, TX, 2000

C. Baxter, N.A McPherson, High-productivity welding of duplex stainless steel. Proceedings of Duplex America, Houston, TX, 2000

B. Holmberg, M.Larén, Welding and applications of the new lean duplex steel LDX 2101. IIW Annual meeting, Prague, Czech Republic, 2005.

C. Eriksson, P.Johansson, M.Liljas, E.M. Westin, Mechanical properties of welds in the new lean duplex stainless steel LDX 2101. Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2003

L. Duprez, B. De Cooman, N. Akudt, Microstructure Evolution During Isothermal Annealing of a Standard Duplex Stainless Steel Type 1.4462, Steel Research, 71, 2000, No.10, p. 417–422

L. van Nassau, H. Meelker, F. Neessen and J. Hilkes, Welding duplex and superduplex stainless steel, an update of the guide for industry, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 17.

L. Karlsson, Duplex stainless steel weld metal – effects of secondary phases, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 43.

C. Baxter, L. Tuveson-Carlström, L. Svensson and A. Brorson, The significance of filler metal type on the stress corrosion cracking and fracture toughness of welded 2205 duplex stainless steel, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 279.

B. Holmberg, How to Perform Welding in Duplex Stainless Steels to Obtain Optimum Weld Metal Properties, Stainless Steel World, March 1997, p. 28.

P. Rouault and C. Bonnet, A new shielding gas range for the TIG, plasma and MIG welding of duplex and superduplex stainless steels, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 289.

R.N. Gunn, Intermetallic formation in superduplex stainless steel heat affected zone, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 335.

L. Karlsson, S.L. Andersson and S. Rigdal, Welding superduplex stainless steels with Ni-base consumables, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 433.

B. Bonnefois, J. Charles, A. Bruyere, and R. Cozar, Welding of super duplex steels: new efficient solutions for joining using Ni alloys filler materials, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 499.

D.N. Noble, W. A. Bruce, and R.N. Gunn, Hot tapping 22% Cr duplex stainless steel, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 471.

K. Yasuda, R.N. Gunn, and T.G. Gooch, Prediction of austenite content in duplex stainless steels weld metals, Paper 26, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

L. Odegard, C-O Pettersson and S-A Fager, The selection of welding consumables and properties of dissimilar welded joints in the superduplex stainless steel Sandvik SAF 2507 to carbon steel and highly alloyed austenitic and duplex stainless steels, Paper 94, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

V. van der Mee, H. Meelker, and L. van Nassau, How to avoid hydrogen cracking in (super) duplex stainless steel weldments, Paper 119, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

M. Liljas, The welding metallurgy of duplex stainless steels, Paper KV, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

D.J. Kotecki and J.L. P. Hilkes, Welding processes for duplex stainless steels, Paper KVI, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

Contrôle

F.H. Dijkstra and J.A. de Raad, Non-destructive testing of duplex welds, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 509.

D.J. Kotecki, Ferrite measurement in duplex stainless steel, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 957.

C.I.K. Sinclair and B.W.O. Shepherd, Non-destructive testing of welds in duplex stainless steels, Paper 63, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

J.D. Redmond and R.M. Davison, Critical Review of Testing Methods Applied to Duplex Stainless Steels, *Stainless Steel World*, April 1998, p. 37–45

Bibliographie

- 1 J. Charles, Super duplex stainless steels: structure and properties, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, p. 3, 1991.
- 2 R. Sánchez, I. Moreno, J. Almagro, J. Botella, X. Llovet, Effects of Composition and Thermal History on the Phase Balance and Elements Distribution of Standard and Modified Duplex Stainless, Fourth Stainless Steel Science and Market Congress, Paris 2002, Conference Proceedings
- 3 I. Zucato, M. C. Moreira, I. F. Machado and S. M. Giampietri Lebrão, Microstructural Characterization and the Effect of Phase Transformations on Toughness of the UNS S31803 Duplex Stainless Steel Aged Treated at 850 °C, Materials Research Print version ISSN 1516-1439, Mat. Res. vol.5 no.3 São Carlos July/Sept. 2002
- 4 B. Josefsson, J.-O. Nilsson and A. Wilson, Phase Transformations in duplex steels and the relation between continuous cooling and isothermal heat treatment, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 67.
- 5 C. Hounглу and S. Hertzman, Kinetics of Intermetallic Phase Formation in Duplex Stainless Steel and Their Influence on Corrosion Resistance, Report IM-2689, Swedish Institute of Metals Research, Stockholm, Sweden.
- 6 G. Herbsleb and P. Schwaab, Precipitation of Intermetallic Compounds, Nitrides and Carbides in AF 22 Duplex Steel and their Influence on Corrosion Behavior in Acids, Proceedings of Duplex Stainless Steels Conference, ASM, Metals Park, Ohio, 1983, p.15
- 7 L. Iturgoyen and M. Anglada, The Influence of Aging at 475°C on the Fatigue Crack Propagation of a Duplex Stainless Steel, Proceedings of Stainless Steels '91, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan, Vol. 2, p. 746, 1991.
- 8 D. Bauernfeind and G. Mori, Corrosion of Superaustenitic Stainless Steels in Chloride- and Sulfate-Containing Media-Influence of Alloying Elements Cr, Mo, N, and Cu, Proceedings of NACE Corrosion 2003 Conference, Paper 03-257
- 9 P.-E. Arnvig, and W. Wasielewska, Stress Corrosion Behaviour of Highly Alloyed Stainless Steels under Severe Evaporative Conditions, ACOM 3-1993, Avesta Sheffield AB, 1993.
- 10 A. Miyasaka, K. Denpo and H Ogawa, Prediction of Application Limits of Stainless Steels in Oilfield Equipment, Proceedings of Stainless Steels '91, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan, Vol. 1, p. 241, 1991.
- 11 J.J. Eckenrod, et al, "Effects of Chemical Composition and Thermal History on the properties of Alloy 2205 Duplex Stainless Steel", New Developments in Stainless Steel Technology, R. A Lula, Ed., ASM 1985.
- 12 R.M. Davison and J.D. Redmond, Paper No. 302, CORROSION/91, NACE International, Houston, Texas, 1991.
- 13 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Paragraph UHA 51.

Annexe 1 : Désignations des aciers inoxydables duplex et appellations commerciales des produits

N° UNS	Nuance	N° EN	Désignation EN	JIS/Japon	GB/Chine	KS/Corée	Appellation commerciale
S31200					022Cr25Ni6Mo2N		44LN
S31260					022Cr25Ni7Mo3 WCuN		DP3 DP12
S31500							3RE60
S32001		1.4482	X2CrMnNiMoN21-5-3				Nitronic 19D
S32003							ATI 2003
S32101		1.4162	X2CrMnNiN21-5-1				LDX 2101 B2101
S32202							UR 2202
S31803 S32205	2205*	1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	SUS 329 J3L	022Cr22Ni5Mo3N	STS 329J3L	SAF 2205 UR 2205 UR 2205+ UR 2205Mo DMV 22-5 ATI 2205 2205 Code Plus Two NAS 329J3L NSSC DX1 DP8 B2205
S32304	2304*	1.4362	X2CrNiN23-4		022Cr23Ni5Mo3N		SAF 2304 UR 2304 B2304
S32506							NAS 64
S32520		1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3				UR 2507Cu
S32550	255*				03Cr25Ni6Mo3Cu2N		Ferrallium 255 UR 2507Cu
S32707							SAF 2707 HD
S32750	2507*	1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	SUS 329 J4L	022Cr25Ni7Mo4N	STS 329 J4L	AF 2507 UR 2507 NAS 74N SAF 2507
S32760		1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4				Zeron 100 UR 2507W NAS 75N
S32808							DP28W
S32900	329	1.4460	X3CrNiMoN27-5-2	SUS 329 J1	0Cr26Ni5Mo2	STS 329 J1	
S32906							SAF 2906

N° UNS	Nuance	N° EN	Désignation EN	JIS/Japon	GB/Chine	KS/Corée	Appellation commerciale
S32950							7-Mo Plus
S32960							
S33207							SAF 3207 HD
S39274							DP-3W
S39277							AF918
S82011							ATI 2102
–		1.4655	X2CrNiCuN23-4				
–		1.4477	X2CrNiMoN29-7-2				
–		1.4424	X2CrNiMoSi18-5-3				

* Désignation courante, il ne s'agit pas d'une marque déposée ; son emploi est répandu et n'est pas associé à un producteur particulier

Annexe 2 : Récapitulatif des normes

Normes ASTM/ASME

N° UNS	Nuance	A 815	A 959	A 480/M SA 480	A 314	A 240/M SA 240	A 484/M SA 484	A 276 SA 276	A 479/M SA 479
		Raccords et accessoires de tuyauterie	Nuances corroyées	Spécifications générales	Billettes	Produits plats	Spécifications générales	Poutrelles, profilés spéciaux et laminés marchands	Poutrelles, profilés spéciaux et laminés marchands
S31200			X	X		X			
S31260			X	X		X			
S31803		X	X	X		X	X	X	X
S32001			X	X		X			
S32003			X	X		X			
S32101		X	X	X		X	X	X	X
S32202		X		X	X	X	X	X	X
S32205	2205	X	X	X		X	X	X	X
S32304	2304		X	X		X	X	X	
S32506			X	X		X	X	X	X
S32520			X	X		X			
S32550	255	X	X	X		X	X	X	X
S32707									
S32750	2507	X	X	X		X	X	X	X
S32760		X	X	X	X	X	X	X	X
S32900	329		X	X		X	X		
S32906			X	X		X	X		X
S32950		X	X	X	X	X	X		X
S39274		X	X	X		X			
S39277			X				X		X
S33207									
S82011				X		X			

Normes EN

N° EN	Désignation EN	EN 10028-7	EN 10088-2	EN 10088-3	EN 10088-4	EN 10088-5	EN 10095	EN 10216-5
1.4362	X2CrNiN23-4	X	X	X	X	X	X	X
1.4655	X2CrNiCuN23-4		X					
1.4460	X3CrNiMoN27-5-2			X		X		
1.4477	X2CrNiMoN29-7-2		X	X	X	X		
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	X	X	X	X	X		X
1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3	X	X	X				X
1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	X	X	X	X	X		X
1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4	X	X	X				X
1.4424	X2CrNiMoSi18-5-3		X	X	X	X		X
1.4062	X2CrNiN22-2							
1.4162	X2CrMnNiN21-5-1				X	X		

Aciers inoxydables duplex moulés

N° UNS	ASTM 890 moulages, général	ASTM A 995 moulages, pièces sous pression
J93370	X	
J93372	X	X
J93373	X	
J93345	X	X
J93371	X	X
J92205	X	X
J93404	X	X
J93380	X	X

Récapitulatif des titres des normes

Titres des normes	
A 182 / A 182M	Forged or Rolled Alloy-Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service
A 240 / A 240M	Heat-Resisting Cr and Cr-Ni Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels
A 270	Seamless and Welded Austenitic and Ferritic / Austenitic Stainless Steel Sanitary Tubing
A 314	Stainless Steel Billets and Bars for Forging
A 276	Stainless Steel Bars and Shapes
A 479 / A 479M	Stainless Steel Bars and Shapes for Use in Boilers and Other Pressure Vessels
A 480 / A 480M	General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip
A 484 / A 484M	General Requirements for Stainless Steel Bars, Billets, and Forgings
A 580 / A 580M	Stainless Steel Wire
A 789 / A 789M	Seamless and Welded Ferritic / Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service
A 790 / A 790M	Seamless and Welded Ferritic / Austenitic Stainless Steel Pipe
A 815 / A 815M	Wrought Ferritic, Ferritic / Austenitic, and Martensitic Stainless Steel Fittings
A 890 / A 890M	Castings, Fe-Cr-Ni-Mo Corrosion-Resistant, Duplex for General Application
A 923	Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Wrought Duplex Stainless Steels
A 928 / A 928M	Ferritic / Austenitic Stainless Steel Pipe Electric Fusion Welded with Addition of Filler Metal
A 959	Harmonized Standard Grade Compositions for Wrought Stainless Steels
A 988 / A 988M	Hot Isostatically-Pressed Stainless Steel Flanges, Fittings, Valves, and Parts for High Temperature Service
A 995 / A 995M	Castings, Austenitic-Ferritic (Duplex) Stainless Steels for Pressure-Containing Parts
API 650	Welded Steel Tanks for Oil Storage
NSF / ANSI 61	Drinking Water System Components
NACE MR0175	Sulphide stress cracking resistant material for oil field equipment
EN 10028-7	Flat products made of steels for pressure purposes – Part 7: Stainless steels
EN 10088-2	Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes

Titres des normes	
EN 10088-3	Stainless steels – Part 3: Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes
EN 10095	Heat resisting steels and nickel alloys
EN 10216-5	Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 5: Stainless steel tubes
EN 10217-7	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 7: Stainless steel tubes
EN 10222-5	Steel forgings for pressure purposes – Part 5: Martensitic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels
EN 10250-4	Open die steel forgings for general engineering purposes – Part 4: Stainless steels
EN 10263-5	Steel rod, bars and steel wire for cold heading and cold extrusion – Part 5: Technical delivery conditions for stainless steels
EN 10272	Stainless steel bars for pressure purposes
EN 10296-2	Welded circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Stainless steel
EN 10297-2	Seamless circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Stainless steel
EN 10312	Welded stainless steel tubes for the conveyance of aqueous liquids including water for human consumption – Technical delivery conditions
EN ISO 8249	Welding – Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr-Ni stainless steel-weld metals
VdTÜV WB 418	Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4462
VdTÜV WB 496	Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4362
VdTÜV WB 508	Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4410



INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION

Avec le concours de :
International Stainless Steel Forum (www.worldstainless.org)
Euro Inox (www.euro-inox.org)

ISBN 978-1-907470-05-9

