

Welding duplex and super-duplex stainless steels

- A Guide for Industry -

L. van Nassau, H. Meelker, and J. Hilkes

Printed from
Welding in the World, Vol. 31, no. 5, 1993,
with the permission of the International Institute of Welding

Ref.: Doc II – 1190 - 92

Welding duplex and super-duplex stainless steels

by L. van Nassau, H. Meelker and J. Hilkes (The Netherlands)

Introduction

Industrial conditions, especially involving Cl-containing aqueous fluids, may require materials with improved corrosion and/or strength properties compared to a standard austenitic stainless steel grade (AISI 316L or X2 CrNiMo 18 12). To meet this need a duplex stainless steel grade with approx. 18.5% Cr, 5% Ni, 2.7% Mo and 0.1% N was introduced in the 1970s. This grade is no longer promoted by the manufacturers but new low carbon stainless steel grades with 22–27% Cr, 4–8% Ni, 0.1–0.3% N with or without Mo (1.5–4%), and in some cases with additional elements, have been developed. They form the current families of duplex and super-duplex stainless steels, with the austenite–ferrite structure in common.

The corrosion behaviour of these steels is characterized primarily by their reliable chloride stress corrosion resistance and high resistance to pitting corrosion in more severe conditions. These corrosion resisting properties can be combined with at least 100% higher proof strength properties, compared to AISI 316L, in a temperature range of -10 to $+250^{\circ}\text{C}$ (possibly extending down to -20°C to -50°C * under specific qualifications and to $+280^{\circ}\text{C}$ for unwelded structures). The engineering properties of the materials cannot be generalized. They differ for each of the material grades and product forms, and selection criteria must be defined with knowledge of the service conditions.

The base material is available in various product forms, either solution annealed or work hardened. Most industrial constructions include the application of welding techniques.

Early applications, and even today's projects, have frequently been associated with such problems as cracking or preferential corrosion behaviour. Consequently, welding of duplex and super-duplex stainless steel has been subject to funda-

mental and applied research. The results of laboratory experiments and field experience in the chemical industry, as well as in transportation and processing of oil and gases, have been collected and summarized in this document. It is intended to be a guide for industry with the objectives of:

- providing sufficient background information with regards to materials and welding techniques
- describing measures to avoid or limit deleterious structural transformations
- describing basic factors in welding material selection and application
- to providing guidelines for heat treatment and surface treatment of welded structures.

This guidance recognizes modern technology but has the unavoidable limitation of being general for classes of materials (not trade name specific) and service conditions.

2. Base materials

2.1. Commercial grades

Duplex and super-duplex stainless steel grades are established in various product forms:

- plate
- pipes (longitudinally welded and seamless)
- castings (e.g. pump houses and internals)
- forgings (e.g. flanges) and fittings
- bars, wires.

The steels are almost exclusively produced by the argon–oxygen–decarburization (AOD) steel making method, in conjunction with electric arc melting processes.

The distinction between duplex and super-duplex stainless steel is not standardized. The term super-duplex is usually associated with about 25% Cr, $\geq 3.5\%$ Mo and $\geq 0.2\%$ N, providing an increased Pitting Resistance Equivalent ($\text{PRE}_N = \% \text{Cr} + 3.3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N}$ [1]) > 40 . The regular Mo-alloyed duplex grades have a PRE_N value of between 30 and 36.

To structure the terminology, the following duplex stainless steel families can be distinguished:

- (a) 23% Cr Mo-free duplex stainless steel $\text{PRE}_N \sim 25$
- (b) 22% Cr duplex stainless steel 30–36
- (c) 25% Cr (0–2.5% Cu) duplex stainless steel 32–40
- (d) 25% Cr super-duplex stainless steel > 40 .

Well known commercial grades in the European market have been included in Table 1.

2.2. Chemical composition standards

The materials have been classified in various standards. These standards with their range of chemical composition have been listed in Table 2.

This document is prepared as a part of the group sponsored project "Duplex Stainless Steel (phase 2)" under the auspices of the Netherlands Institute of Welding.

This Guide for Industry shall not be considered as an overruling of any Standard. This Guide has been written with the best available knowledge. Neither the authors or the International Institute of Welding will accept any responsibility for errors in or misinterpretation of the information.

IIS/IIW-1165-92 (ex doc. IX-1697-92) prepared by and recommended for publication by IIW Commission IX "Behaviour of metals subjected to welding".

Chairman of IIW Commission IX: Prof. I. Hrivnak (Slovakia)

The authors are with the Lincoln Norweld/Smitweld, Nijmegen, The Netherlands.

*Some authorities limit the lower temperature to -20°C .

Le soudage des aciers inoxydables duplex et superduplex

par L. van Nassau, H. Meelker et J. Hilkes (Pays-Bas)

1. Introduction

Les conditions industrielles, notamment celles qui comportent des fluides aqueux contenant Cl^- peuvent exiger l'emploi de matériaux ayant une meilleure tenue à la corrosion et/ou une meilleure résistance mécanique que celles des aciers inoxydables austénitiques classiques (AISI 316L ou X2 CrNiMo 18 12). Pour satisfaire à ces exigences, un acier duplex contenant environ 18,5% Cr, 5% Ni, 2,7% Mo et 0,1% N a été commercialisé au cours des années 70. Cette nuance n'est plus proposée par les fabricants mais de nouvelles nuances d'aciers inoxydables à 22-27% Cr, 4-8% Ni, 0,1-0,3% N, avec ou sans Mo (1,5-4%), et contenant parfois d'autres éléments, ont été mises au point. Elles constituent les familles actuelles des aciers duplex et superduplex, qui ont, en commun, une structure austéno-ferritique.

La tenue à la corrosion de ces aciers se caractérise essentiellement par leur bonne résistance à la corrosion sous tension en milieu chloruré et leur excellente résistance à la corrosion par piqûres dans des conditions plus sévères. Cette bonne tenue à la corrosion peut être combinée à une limite d'élasticité au moins deux fois plus élevée que celle de la nuance AISI 316L, dans une gamme de températures de -10 à $+250^\circ C$ (allant dans certains cas jusqu'à $-20^\circ C$ ou $-50^\circ C$ pour des qualifications spécifiques et jusqu'à $+280^\circ C$ pour les structures non soudées, étant entendu que certaines autorités limitent à $-20^\circ C$ la température minimale). Les propriétés mécaniques de ces matériaux ne peuvent pas être généralisées. Elles diffèrent suivant les nuances et les formes de livraison, et les critères de choix doivent être définis en connaissant bien les conditions de service.

Les métaux de base sont disponibles sous diverses formes de livraison, à l'état hyperefforté ou écroui. La plupart des constructions industrielles font appel aux techniques de soudage

Ce document représente une partie d'un programme de recherche concertée sur les Aciers Inoxydables Duplex (phase 2), réalisé sous l'égide de l'Institut Néerlandais de la Soudure

Ce Guide à l'intention de l'Industrie ne peut en aucun cas supplanter les normes existantes. Il reflète nos meilleures connaissances actuelles, mais ni les auteurs, ni l'Institut International de la Soudure ne peuvent être tenus pour responsables pour d'éventuelles erreurs contenues dans les informations qui y sont données ou pour les mauvaises interprétations qui pourraient en être faites

IIS/IIW-1165-92 (ex doc IX-1697-92) préparé et recommandé pour publication par la Commission IX de l'IIS "Comportement des métaux du point de vue du soudage".
Président de la Commission IX de l'IIS: Prof. I. Hrivnak (Slovaquie)

Les auteurs travaillent au Lincoln Norweld/Smitweld, Nimègue Pays-Bas

Les premières applications de ces aciers, et mêmes les applications actuelles, ont souvent rencontré des problèmes tels que la fissuration ou la corrosion sélective. De ce fait, le soudage des aciers duplex et superduplex a fait l'objet de nombreuses recherches fondamentales ou appliquées. Les résultats d'expériences effectuées en laboratoire ou in-situ dans l'industrie chimique et dans les industries du transport et de la transformation des gaz et du pétrole ont été recueillis et résumés dans le présent document qui a pour objet de servir de Guide pour l'industrie, et notamment de:

- fournir des informations de base en ce qui concerne les matériaux et les techniques de soudage.
- décrire les mesures permettant d'éviter ou de minimiser les transformations structurales défavorables,
- décrire les facteurs fondamentaux liés au choix et à l'utilisation des produits d'apport de soudage,
- à donner des lignes directrices pour le traitement thermique et le traitement de surface des structures soudées.

Ce guide tient compte de la technologie moderne mais présente inévitablement l'inconvénient d'être général pour les classes de matériaux (pas de marques commerciales spécifiques) et les conditions de service

2. Métaux de base

2.1 Désignations commerciales

Les aciers inoxydables duplex et superduplex sont disponibles sous diverses formes de livraison:

- tôles,
- tubes (soudés longitudinalement ou sans soudure)
- pièces moulées (par exemple: corps et organes internes de pompes),
- pièces forgées (par exemple: brides et raccords),
- barres, fils.

Ces aciers sont presque exclusivement élaborés avec le procédé AOD (argon-oxygène-décarburation), par fusion à l'arc.

La distinction entre aciers inoxydables duplex et superduplex n'est pas normalisée. Le terme superduplex s'applique généralement aux aciers contenant environ 25% Cr, $\geq 3,5\%$ Mo et $\geq 0,2\%$ N, composition qui leur confère un meilleur Equivalent en Résistance à la Corrosion par Piqûres [1] ($PRE_N = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$) soit > 40 . Les nuances duplex classiques au Mo ont un PRE_N compris entre 30 et 36

Table 1. Duplex stainless steel grades/ Tableau 1. Nuances d'aciers duplex

Manufacturer/Fabricant	Grade/Nuance	Chemical composition wt %*/ Composition chimique % en poids*					Cu	Other/Autres	PRE _N	Product forms/Formes
		Cr	Ni	Mo	N					
(a) 23% Cr Mo-free duplex stainless steel/Duplex à 23% Cr sans Mo										
Avesta	SAF 2304	23	4	—	0.1	—	—	25	All product forms/Toutes formes de produits	
Creusot Ind	UR 35N	23	4	—	0.12	—	—	25	Plate, bars, forgings/Tôles, barres, pièces forgées	
Sandvik	SAF 2304	23	4	—	0.1	—	—	25	Pipe/Tubes	
(b) 22% Cr duplex stainless steel/Duplex à 22% Cr										
Avesta	2205									
Böhler	A 903									
Creusot Ind	UR 45N									
Fabr de Fer	1 4462/PRE 35									
Krupp	Falc 223									
Mannesmann	AF22 (1 4462)	22	5.5	3	0.14	—	—	34/35†	All product forms depending on manufacturer/Toutes formes de produits selon fabricant	
Nippon Kokan	NKCr22									
Sandvik	SAF 2205									
Sumitomo	SM22Cr									
TEW	Remanit 4462									
Valourec	VS22									
(c) 25% Cr (0-2.5% Cu) duplex stainless steel/Duplex à 25% Cr (0-2,5% Cu)										
Böhler	A 905	25.5	3.7	2.3	0.37		Mn: 5.8	39	Plate, forgings/Tôles, pièces forgées	
Carpenter	7-Mo Plus	27.5	4.5	1.5	0.25			36.5		
Creusot Ind	UR 47N	25	7	3.0	0.16	0.2		37.5	Plate, bars/Tôles, barres	
	UR 52N	25	7	3.0	0.16	1.5		37.5	Forgings/Pièces forgées	
Langley	Ferralium 255	26	5.5	3.3	0.17	2.0		38.5	Castings/Moulages	
Mather & Platt	Zeron 25	25	4	2.5	0.15	—	—	35.5	Castings/Moulages	
Sumitomo	DP 3	25	6.5	3.0	0.2	0.5	W: 0.3	38	Plate, bars, wire, pipe/Tôles, barres, fils, tubes	
(d) 25% Cr super-duplex stainless steel/Superduplex à 25% Cr										
Pleissner	9 4462 S	26	7	3.5	0.25	0.6		> 41	Castings/Moulages	
Krupp-VDM	Falc 100	25	7	3.5	0.25	0.7	W: 0.7	41	Plate, forgings, pipes, fittings/Tôles, pièces forgées, tubes, raccords	
Avesta	SAF 2507	25	7	4.0	0.28			42.5}	Plate, forgings, tubes, fittings, castings/Tôles, pièces forgées, raccords	
Sandvik	SAF 2507	25	7	4.0	0.28			42.5}	pièces moulées	
WMS‡	Zeron 100	25	6.5	3.7	0.25	0.7	W: 0.7	41}	Plate, forgings, tubes, fittings, castings/Tôles, pièces forgées, tubes, raccords, moulages	

*C_{max}: 0.3 or 0.04%/C_{max}: 0.03 ou 0.04%.

†Compositions enriched in Cr, Mo, N allow some manufacturers to guarantee PRE_N > 35/Nuances plus chargées en Cr, Mo, N; permettent aux aciéristes de garantir PRE_N > 35.

‡Weir Materials Ltd together with other manufacturers/Weir Materials et d'autres fabricants.

2.3 Mechanical properties

The mechanical properties in the classification depend on product type (rolled, cast) and final heat treatment. The limits as published in VdTUV Werkstoffblatt 418 and ASTM Standards are listed in Table 3.

2.4 Corrosion properties

Duplex and super-duplex grade base materials have similar pitting and crevice corrosion resistance compared to austenitic grades of similar alloying content, but generally have superior stress corrosion cracking resistance and resistance to organic acids. The ranking of pitting corrosion resistance on the basis of the pitting corrosion index PRE_N is generally accepted by industry. A brief summary of typical corrosion data is listed in Table 4. Details must be obtained from the steel manufacturer.

It has to be emphasized that the standard corrosion tests

indicated may not be directly relevant to the conditions encountered in practice. The particular condition of the material and environmental factors have to be recognized.

2.5 Physical properties

Table 5 gives the main physical properties of base materials, for the purpose of engineering work.

2.6 Forming

Welded structures are built up from flat or formed plate or parts. Shaping can be by hot or cold forming. Solution annealing followed by a water quench will be applied on hot formed and cold formed material, the latter if the deformation exceeds 10–15%, depending on the parent material grade and service conditions.

Welded parts may also be subjected to these mechanical

Table 2. Identification codes, material standards/ Tableau 2. Codes d'identification; normes de matériaux

Standard/Norme	Classification/Classification	Chemical composition wt %*/Composition chimique, % en poids*									
		C	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W	P	S	
UNS†	S31200	min.		24.0	5.5	1.2	0.14	—	—		
		max.	0.030	26.0	6.5	2.0	0.20				
	S31260	min.		24.0	5.5	2.5	0.10	0.20	0.10		
		max.	0.030	26.0	7.5	3.5	0.30	0.80	0.50	0.030	0.030
	S31803	min.		21.0	4.5	2.5	0.08	—	—		
		max.	0.030	23.0	6.5	3.5	0.20			0.030	0.020
	S32304	min.		21.5	3.0	0.05	0.05	—	—		
		max.	0.030	24.5	5.5	0.6	0.20			0.040	0.040
	S32550	min.		24.0	4.5	2.0	0.10	1.5	—		
		max.	0.04	27.0	6.5	4.0	0.25	2.5		0.040	0.030
	S32750	min.		24.0	6.0	3.0	0.24	—	—		
		max.	0.030	26.0	8.0	5.0	0.32			0.035	0.020
	S32760	min.		24.0	6.0	3.0		0.5	0.5		
		max ‡	0.030	26.0	8.0	4.0	0.3	1.0	1.0	0.03	0.01
ASTM	A182, A240, A744, A789, A790 a o include above-mentioned UNS grades/A182, A240, A744, A789, A790 etc comportent les nuances UNS ci-dessus										
VdTUV Werkstoffblatt 418/ Werkstoffblatt 418 du VdTUV	min.		20.8	4.40	2.4	0.07					
	max.	0.030	23.2	6.60	3.6	0.21			0.040	0.025	

*Mn various max levels (1.0-2.0%); Si various max levels (0.75-1.0%) /Diverses teneurs maxi en Mn (1.0-2.0%) et en Si (0.75-1.0%).

†Specified in ASTM Standards /Spécifié dans les normes ASTM

‡PRE_N > 40

Pour structurer la terminologie, on peut distinguer les familles d'aciers inoxydables duplex suivantes:

- (a) acier duplex à 23% Cr, sans Mo PRE_N env. 25
- (b) acier duplex à 22% Cr 30-36
- (c) acier duplex à 25% Cr (0-2,5% Cu) 32-40
- (d) acier superduplex à 25% Cr > 40.

Les principales nuances commercialisées en Europe sont présentées au Tableau 1.

2.2 Compositions chimiques normalisées

Ces aciers ont été classifiés dans diverses normes. Le Tableau 2 présente ces normes, avec les compositions correspondantes.

2.3 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques dans la classification dépendent du type de produit (laminé, moulé) et du traitement thermique final. Les valeurs limites telles que publiées dans la Werkstoffblatt 418 du VdTUV et dans les normes ASTM sont présentées au Tableau 3.

2.4 Tenue à la corrosion

Les aciers de base duplex et superduplex ont la même résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion cavernueuse que les nuances austénitiques de composition similaire, mais ils résistent généralement mieux à la corrosion fissurante et à la corrosion aux acides organiques. Le classement de la résistance à la corrosion par piqûres en fonction de l'indice PRE_N de corrosion par piqûres est généralement admis par l'industrie.

Un bref résumé des données typiques relatives à la corrosion est présenté au Tableau 4. Pour obtenir des valeurs détaillées il est nécessaire de s'adresser aux aciéristes.

Il convient de noter que les essais de corrosion normalisés mentionnés dans le tableau ne sont pas toujours représentatifs des conditions spécifiques rencontrées dans la pratique. L'état du matériau et les facteurs liés à l'environnement doivent être pris en compte.

2.5 Propriétés physiques

Le Tableau 5 indique les principales propriétés physiques des métaux de base.

2.6 Formage

Les structures soudées sont constituées de tôles planes ou formées, ou d'éléments de formes plus complexes. Le formage peut être exécuté à chaud ou à froid. L'hypertrempe, qui s'accompagne d'une trempe à l'eau, est appliquée au matériau déformé à chaud ou à froid (plutôt à froid si la déformation excède 10-15%), selon la nuance de l'acier de base et les conditions de service.

Les assemblages soudés peuvent également être soumis à ces traitements pour avoir leurs dimensions ou leurs formes définitives. Par exemple les fonds bombés. Le soudage d'éléments déformés à froid influe sur la répartition des contraintes, y compris la relaxation locale des contraintes dans la zone thermiquement affectée. On n'observe pas d'effets majeurs autres que les modifications de dimensions (planéité).

Le formage à froid des assemblages soudés jusqu'à 5% de déformation est acceptable mais entraîne une certaine dégradation de la ténacité du métal fondu (Charpy V, CTOD). Le formage à chaud exige une stricte maîtrise de la température et est généralement suivi d'un recuit. Le redressage à la flamme n'est pas recommandé.

Table 3. Material mechanical properties at room temperature and elevated temperatures/ Tableau 3. Propriétés mécaniques des matériaux à l'ambiante et à hautes températures

Product form/Forme du produit	Thickness range (mm)/ Épaisseurs (mm)	Test temp (°C)/ Tempér d'essai (°C)	Rp0.2 (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A5 (%)	CVN (J)	HRc
VdTÜV Werkstoffblatt 418: WNr. 1 4462/Werkstoffblatt 418 du VdTÜV: N° de matériau 1 4462							
Plate/Tôles	max 20	20	min 480	680-880	min 25	min 104	
Forgings bars/Pièces forgées barres	max 100	20	min 450	680-880	min 30	min 104	
Castings/Pièces moulée	not spec./non spécif						
ASTM*	A182: flanges/brides A789: tubing/petits tubes		A240: plate sheet/tôles A790: pipe/gros tubes				
including/comprenant:					A4		
UNS S31200		RT/ambiante	min 450	690-900	min 25		—
UNS S31260		RT/ambiante	min 440	min 630	min 30		max 30 5
UNS S31803		RT/ambiante	min 450	min 620	min 25		max 30 5-32
UNS S32304		RT/ambiante	min 400	min 600	min 25		max 30 5
UNS S32550		RT/ambiante	min 550	min 760	min 15		max 31 5-32

The VdTÜV Werkstoffblatt for W.Nr 1 4462 gives a minimum 0.2% proof strength at elevated temperatures;/La Werkstoffblatt du VdTÜV relative au matériau N° 1 4462 indique les valeurs minimales suivantes de limite d'élasticité à hautes températures:

	Test temp. (°C) Tempér d'essai (°C)	Rp0.2 (N/mm ²)
Seamless pipe/Tubes sans soudure	100	360
	150	335
	200	310
	250	295
	300	285

*Thickness ranges not specified /Gammes d'épaisseurs non spécifiées

Table 4. Corrosion data/ Tableau 4. Données relatives à la corrosion

Steel grade/Nuance d'acier	23% Cr, Mo-free duplex/ Duplex à 23% Cr. sans Mo	22% Cr duplex/ Duplex à 22% Cr	25% Cr (0-2.5% Cu) duplex/Duplex à 25% Cr (0-2.5% Cu)	25% Cr super-duplex/ Superduplex à 25% Cr
Corrosion phenomena/ Conditions de corrosion	in acidic environments similar or better than AISI 316L/en milieux acides: égale ou supérieure à celle de AISI 316L.			
General corrosion/ Corrosion uniforme	in acidic environments similar or better than AISI 316L/en milieux acides: égale ou supérieure à celle de AISI 316L.			
Pitting CPT*/piqûres TCP*				
-6% FeCl ₃ 24 h		30-35°C	>35-40°C	80-85°C
-3% NaCl				
neutral, aerated/neutre aéré	300 mV _{SCE} /300 mV _{ECS} : 30°C	300 mV _{SCE} /300 mV _{ECS} : 70°C 600 mV _{SCE} /600 mV _{ECS} : 50°C		600 mV _{SCE} /600 mV _{ECS} : 100°C
SCC/Corrosion fissurante				
- CaCl ₂ 40%	stress/strength/contrainte/ résistance: 0.8	stress/strength/contrainte/ résistance: 0.95		stress/strength/contrainte/ résistance: 0.95
pH = 6.5. 100°C	no cracking/pas de fissuration	no cracking/pas de fissuration		no cracking/pas de fissuration
aerated aéré. 500 h				
- Cl ⁻ solutions/solutions Cl ⁻	0.1% Cl ⁻ : max 130°C	0.1% Cl ⁻ : max 170°C		0.1% Cl ⁻ : >> 260°C
~ 8 ppm O ₂ neutral/ neutre				1% Cl ⁻ : > 260°C
- NACHE H ₂ S TM-01-77 5% NaCl 0.5% HAC	stress/contrainte: 0.75 × Rp0.2 RT/ambiante p _{H₂S} = 1 bar: generally not susceptible/ généralement insensible.	stress/contrainte: 1.1 × Rp0.2 RT/ambiante p _{H₂S} = 1 bar: generally not susceptible/ généralement insensible.		stress/contrainte: 1.1 × Rp0.2 RT/ambiante p _{H₂S} = 1 bar: generally not susceptible/généralement insensible
1000 h stress at Rp0.2 at test temp / contrainte à Rp0.2 à la tempér d'essais				90°C p _{H₂S} = 16 bar: generally not susceptible/ généralement insensible

*Critical crevice temperature ~25°C below CPT /Température critique de crevasses: env 25°C en-dessous de TCP (Température Critique de Piqûration).

Table 5. Physical properties/ Tableau 5. Propriétés physiques

Steel grade/Nuance	23% Cr. Mo-free duplex/ Duplex à 23% Cr sans Mo	22% Cr duplex/ Duplex à 22% Cr	25% Cr super-duplex/ Superduplex à 25% Cr	AISI 316L
Thermal conductivity/Conductivité thermique (W/m°C)	20°C	16	19	15
	100°C	17	19	16
	200°C	19	21	17.5
	300°C	20	23	19
Thermal expansion/Dilatation thermique (mm/mm°C × 10 ⁻⁶)	20-100°C	13.0	13.5	16.5
	20-200°C	13.5	14.0	17.0
	20-300°C	14.0	14.5	17.5

Table 6. Variation in chemical composition in the weld metal structure components austenite and ferrite (approx. wt%)/Tableau 6. Variations dans la composition chimique de la structure ferritique et austénitique du métal fondu (% en poids approx.)

Weld metal type/Type de métal fondu	Phase/Phase	Cr	Ni	Mo	N
22Cr-10Ni-3Mo-0.12N	ferrite/ferrite	22-23.5	8.5-9.5	3-3.5	<0.05
	austenite/austénite	20-21.5	10.5-11.5	2.5-3	0.2-0.5
22Cr-6Ni-3Mo-0.12N	ferrite/ferrite	21-24	5.5-8	2.5-3.5	<0.05
	austenite/austénite	21-24	5.5-8	2.5-3.5	0.3-0.6
22Cr-6Ni-3Mo-0.18N	ferrite/ferrite	22-24	5-6	3-4	<0.05
	austenite/austénite	21-22	6-8	2.5-3	0.3-0.6

Table 7. Results of EDX phase analysis on MMA welds in 13 mm UNS S31803 steel made with overalloyed (Ni) weld metal under varying arc energy conditions [5]/Tableau 7. Résultats de la microanalyse X à dispersion d'énergie de soudures sur acier UNS S31803 de 13 mm réalisées à l'arc avec électrode enrobée avec différents apports d'énergie, à métal fondu surchargé en Ni [5]

Weld region/Zone de soudure	Phase	Element wt%/Eléments. % en poids		
		Cr	Ni	Mo
As-deposited root*/Racine brute de dépôt*	ferrite/ferrite	23.9	7.5	3.0
	austenite/austénite	23.7	7.8	2.8
Reheated root*/Racine réchauffée*	ferrite/ferrite	23.7	7.2	3.0
	austenite/austénite	23.4	7.7	2.7
As-deposited root†/Racine brute de dépôt†	ferrite/ferrite	23.8	7.2	2.7
	austenite/austénite	23.7	7.7	2.5
Reheated root†/Racine réchauffée†	ferrite/ferrite	25.1	6.2	3.7
	austenite/austénite	22.7	8.6	2.5
As-welded HAZ‡/ZIA brute de soudage‡	ferrite/ferrite	21.3	5.6	2.9
	austenite/austénite	21.3	5.7	2.7
Reheated HAZ‡/ZIA réchauffée‡	ferrite/ferrite	21.9	5.2	3.4
	austenite/austénite	20.9	5.9	2.9
Parent steel/Acier de base	ferrite/ferrite	23.2	4.1	3.3
	austenite/austénite	19.5	7.0	2.4

*Root and fill passes at 0.7 kJ/mm /Passes de fond et de remplissage avec une énergie de 0.7 kJ/mm
 †Root at 0.5 kJ/mm, fill passes at 3.2 kJ/mm /Passes de fond avec une énergie de 0.5 kJ/mm, passes de remplissage avec une énergie de 3.2 kJ/mm.

treatments to provide final dimensions or shapes, e.g. dished ends. Welding of cold deformed components influences the stress distribution including local stress relaxation in the heat affected zone. No major effects other than changes of dimensions, such as flatness, are encountered.

Cold forming of weldments at up to 5% strain is acceptable but causes some deterioration of weld metal toughness (CVN, CTOD). Hot forming requires strict temperature control and is usually followed by an annealing treatment. Flame straightening is not recommended.

3. Welding metallurgy

3.1. Solidification structure and austenite formation

During solidification of duplex and super-duplex (weld)-metal, an almost completely ferritic structure is formed. Further cooling initiates the formation of the austenitic phase, nucleating at the ferritic grain boundaries.

The pseudobinary Fe-Cr-Ni constitution diagram for 70 and 60% Fe [2, 3] shows the solidification mode (Fig. 1). Solidification of weld metal reflects the heat flow direction and solidification rate. The structure obtained after solidification to room temperature can be predicted with the use of a constitution diagram (see Section 3.2 and Fig. 2)

In weld metal a dendritic microstructure develops in fast cooling conditions and a more globular mode is observed in areas with a lower cooling rate and with a less pronounced heat flow direction. Segregation of alloying elements is associated with solidification at cooling rates typical of welding, and the effect may be important for corrosion properties. Of more significance, transformation to austenite is associated with partitioning of chromium, nickel, molybdenum and nitrogen between ferrite and austenite, as indicated in Table 6 [4]. Table 7 [5] indicates the variation of the chemical composition of phases (Cr, Ni, Mo) in the root and heat affected zone under varying arc energy conditions. The variation of alloying elements in the final structure differs from the original segregation pattern due to transformation and diffusion over a temperature range of perhaps 1300–300°C. It will be noted that the degree of partitioning depends critically on the total thermal cycle experienced during welding. Because of the high temperatures reached close to the fusion boundary during welding, the heat affected zone will show a largely ferritic structure at peak temperature, but again with solid state transformation to austenite on cooling. This will result in partitioning of alloying elements analogous to that in the weld metal.

Representative microstructures are shown in Fig. 3.

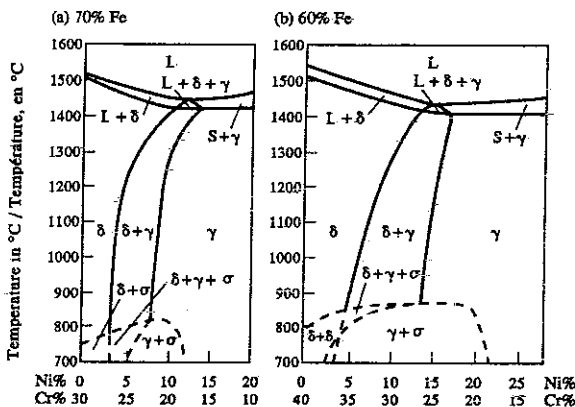


Fig. 1. Pseudo-binary constitution diagrams Fe-Cr-Ni [2]/ Diagrammes de constitution pseudo-binaires Fe-Cr-Ni [2]

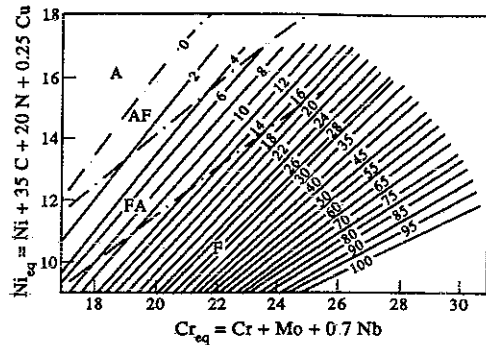


Fig. 2. WRC 1992 Diagram [7]/Diagramme de constitution WRC 1988 [7]

3.2 Ferrite determination

The Welding Research Council (USA) published a constitution diagram [6], based upon more than 900 determinations of chemical composition and the associated Ferrite Number (FN) of various weld metal grades in the state “as solidified to room temperature”. This WRC 1988 Diagram, and its revision to include the effect of Cu [7], the WRC 1992 Diagram (Fig. 2), provides good accuracy for the estimate of the structural balance of weld metal and can be seen as a development of the Schaeffler and DeLong diagrams.

The use of FN to be determined in accordance with the AWS Standard A4 2-91, provides the best means for the determination of a value, representative of the ferrite content. However, it must be understood that this value is not identical with the real volumetric percentage. Other methods for this determination have not yet been proven as accurate. Work in the International Institute of Welding is ongoing with the objective of providing methods to calibrate industrial instruments for the determination of ferrite.

Due to the limitations of the FN determination in the HAZ of weldments, optical methods (including point counting, according to ASTM, and scanning) with limited accuracy are specified and applied in industrial practice.

3.3 High temperature transformation

After solidification, during cooling or during a reheating period in the range of 1300–300°C, various transformation and precipitation reactions may occur. The local chemical composition and microstructure, temperature, time, as well as factors such as level of supersaturation and applied strain, determine the transformation reactions.

Information on various transformation or precipitation reactions for various material compositions and structural conditions is not complete. For 22% Cr duplex grades, reference is usually made to the TTT diagram (Fig. 4) for parent material [8]. In addition to the indicated phases — carbides and nitrides, sigma (FeCr), chi (Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀) — formation of secondary austenite γ₂ in particular is reported for super-duplex material. Figure 5 shows a tentative evaluation of ongoing investigations (ITT) on the embrittlement of weld metal, due to the high temperature formation of sigma and in particular chi-phase [9].

Precipitation of nitrides (and carbides) is important. In particular, nitrides such as Cr₂N and CrN are formed in a ferritic matrix and on grain boundaries [10], in those conditions where nitrogen as alloying element is oversatu-

3. Métallurgie du soudage

3.1. Structure de solidification et formation d'austénite

Pendant la solidification de l'acier duplex et superduplex, notamment du métal fondu des soudures, il se forme une structure presque totalement ferritique. En poursuivant le refroidissement, on amorce la phase austénitique qui se forme aux joints de grains ferritiques.

Le diagramme de constitution pseudo-binaire Fe-Cr-Ni pour 70 et 60% Fe [2,2] 2 et 3 illustre bien le mode de solidification (Fig. 1). La solidification du métal fondu reflète le sens de l'écoulement de la chaleur et la vitesse de solidification. La structure obtenue après solidification jusqu'à l'ambiante peut être prédite à l'aide d'un diagramme de constitution (voir la Section 3.2 et Fig. 2).

Dans le métal fondu, une microstructure dendritique se développe dans des conditions de refroidissement rapide et avec un sens de l'écoulement de la chaleur moins marqué. La ségrégation des éléments d'alliage est associée à la solidification à des vitesses de refroidissement typiques du soudage et cet effet peut être important du point de vue de la tenue à la corrosion. Plus important encore, la transformation en austénite est associée à la redistribution du chrome du nickel, du molybdène et d'azote entre la ferrite et l'austénite, comme on le voit d'après le Tableau 6 emprunté à [réf. 4]. Le Tableau 7 [5] indique la variation de la composition chimique des phases (Cr, Ni, Mo) à la racine de la soudure et dans la zone thermiquement affectée dans diverses conditions d'énergie de l'arc. La variation des éléments d'alliage dans la structure finale diffère de la morphologie originale de la ségrégation du fait de la transformation et de la diffusion dans un intervalle de températures qui est peut-être compris entre 1300 et 300°C. Il convient de noter que le degré de redistribution dépend étroitement du cycle thermique global observé pendant le soudage. Etant donné les hautes températures atteintes à proximité immédiate de la zone de liaison pendant le soudage, la zone thermiquement affectée présente une structure fortement ferritique à la température maximale, mais, là encore, avec une transformation à l'état solide en austénite lors du refroidissement. Ceci se traduit par une redistribution des éléments d'alliage comparable à celle qu'on observe dans le métal fondu.

Les microstructures représentatives sont présentées à la Fig. 3.

3.2. Détermination de la ferrite

Le Welding Research Council (USA) a publié en 1988 un diagramme de constitution (Fig. 2, réf. 6) basé sur plus de 900 déterminations de la composition chimique et de l'indice de ferrite de diverses nuances de métal fondu à l'état "brut de solidification jusqu'à l'ambiante". Ce diagramme et le diagramme révisé incluant l'influence du cuivre [7], et le diagramme du WRC de 1992 (Fig. 2) permettent une estimation précise de l'équilibre structural du métal fondu et peut être considéré comme un développement des diagrammes de Schaeffler et de DeLong.

Le recours à l'indice de ferrite (FN), déterminé selon la norme AWS A4.2-91, fournit le meilleur moyen pour déterminer une valeur représentative de la teneur en ferrite. Toutefois, il faut bien comprendre que cette valeur n'est pas identique au pourcentage volumétrique réel. Les autres

méthodes de détermination ne se sont pas révélées aussi précises. Des travaux en vue de trouver des méthodes pour étalonner les instruments industriels de détermination de la ferrite sont actuellement en cours à l'Institut International de la Soudure.

Etant donné les limites de la détermination de l'indice de ferrite dans la ZTA des assemblages soudés, des méthodes optiques (balayage et comptage de points selon l'ASTM) ayant une précision limitée sont spécifiées et appliquées dans l'industrie.

3.3. Transformations à hautes températures

Après solidification, pendant le refroidissement ou une période de réchauffage dans l'intervalle 1300-300°C, diverses réactions de transformation et de précipitation peuvent se produire. La composition chimique et la microstructure locales, la température, le temps ainsi que des facteurs tels que le niveau de sursaturation et la déformation appliquée, déterminent les réactions de transformation.

Les informations dont nous disposons en ce qui concerne les diverses réactions de transformation ou de précipitation pour les divers matériaux et états structuraux ne sont pas complètes. Pour les nuances d'acier duplex à 22% Cr, il est généralement fait référence aux diagrammes TTT (Fig. 4) du métal de base [8]. En plus des phases indiquées, c'est-à-dire carbures et nitrides, sigma (FeCr), chi on signale en particulier la formation d'austénite secondaire γ_2 pour l'acier superduplex. La Fig. 5 illustre un projet d'évaluation des recherches en cours (TTT) sur la fragilisation du métal fondu liée à la formation, à haute température, de la phase sigma et surtout de la phase chi [9].

La précipitation de nitrides (et de carbures) est importante. En particulier, les nitrides tels que Cr_2N et CrN se forment dans une matrice ferritique et aux joints de grains [10], lorsque l'azote en tant qu'élément d'alliage est sursaturé. Dans le métal de base à forte teneur en azote, la ZTA est plus stable (grâce à une plus forte teneur en austénite), ce qui se traduit par une moindre sensibilité à la précipitation de nitrides.

3.4. Vieillissement

Les transformations à hautes températures sont des réactions relativement rapides. Toutefois, des processus de durcissement entraînant la formation de la phase alpha prime (α') dans l'intervalle de températures 280-500°C exigent des temps d'exposition plus longs, le temps minimum correspondant à une température de 475°C. A 280°C, les métaux fondus en acier duplex et superduplex subissent un vieillissement important lorsque, la durée d'exposition est supérieure à 10000 h.

La formation de la phase alpha prime provoque une sévère fragilisation du métal de base et du métal fondu à la température ambiante. Pour cette raison, les applications des structures soudées sont limitées à une température maximale de 250°C, du moins pour les durées de service habituelles.

3.5. Contrôle des gaz solubles (azote et hydrogène atomiques)

L'azote joue un rôle extrêmement important dans le contrôle

rated. In high N-alloyed parent material, the HAZ is more stable (due to the higher austenite content) which results in a lower sensitivity for nitride precipitation

3.4 Ageing

Transformations at elevated temperatures are relatively fast reactions. However, ordering processes causing the formation of alpha prime (α') in the temperature range of 280–500°C require longer exposure times with a minimum at 475°C. At 280°C duplex and super-duplex stainless steel weld metal show severe ageing effects when exposed during long times (> 10,000 h).

The formation of alpha prime causes severe embrittlement in parent material as well as in weld metal at room temperature. For this reason, application of welded structures is limited to a maximum temperature of 250°C, at least for usual service lives

3.5 Control of soluble gases (atomic nitrogen and hydrogen)

Nitrogen is of greatest importance in the control of microstructure. The following factors should be considered:

— strong austenite forming power equivalent to $20 \times \%N$ (see Fig. 2).

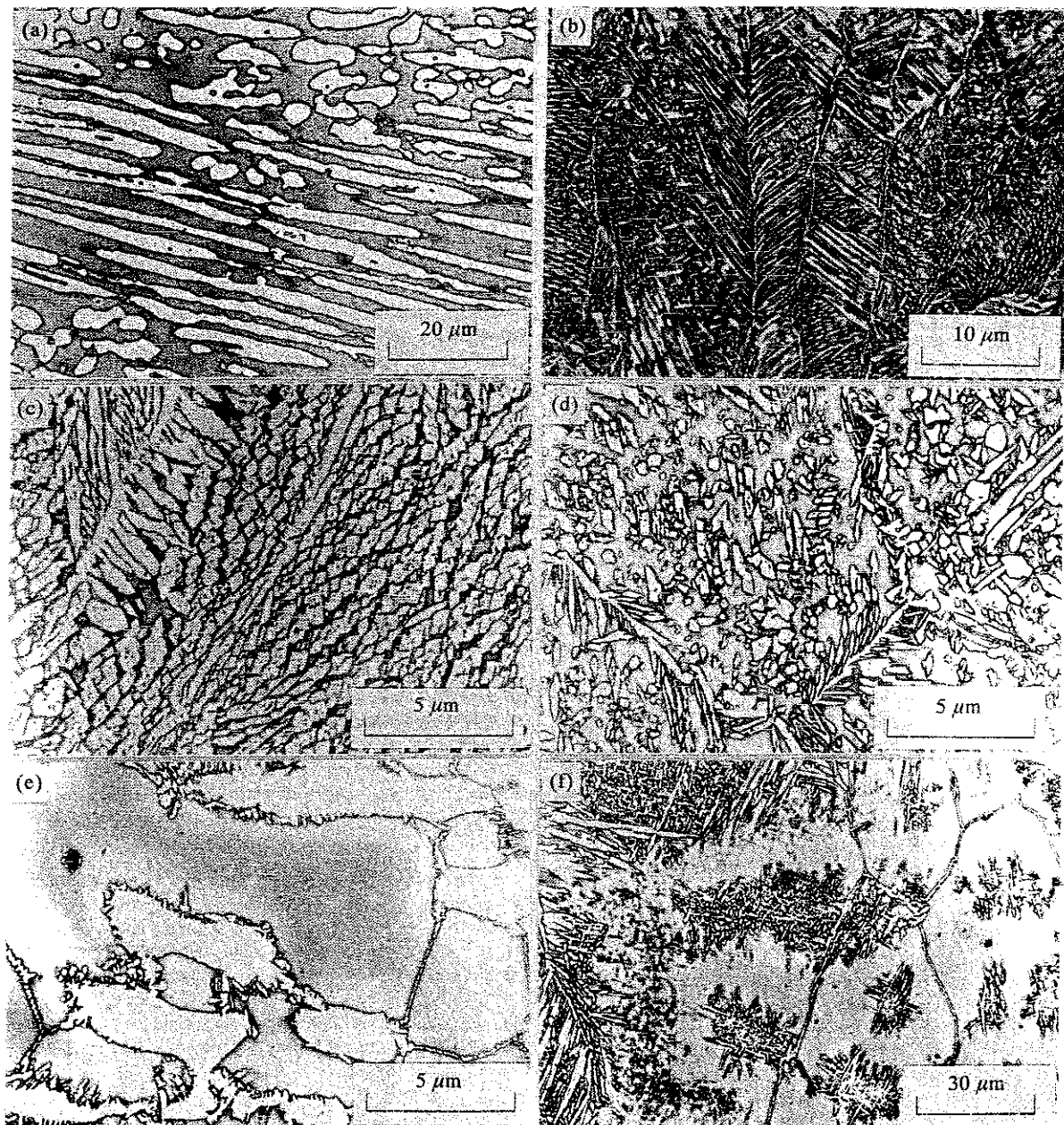


Fig. 3. Microstructure of duplex stainless steel weldments (a) Base material 22% Cr duplex, solution annealed at 1050°C/water quenched, NaOH electr.; (b) Weld metal structure, as-welded, filling pass, SMAW, E 22 9 3L, NaOH, electr.; (c) Weld metal structure, capping pass, as-welded, SMAW, E 22 9 3L, NaOH, electr.; (d) Weld metal structure, as-welded, root run, GTAW, ER 22 9 3L, NaOH, electr.; (e) Heat affected zone structure, free from precipitation and secondary austenite, NaOH, electr.; (f) Heat affected zone structure of 22% Cr duplex with secondary austenite, NaOH, electr. /Microstructures d'assemblages soudés en acier duplex. (a) Métal de base en acier duplex à 22% Cr, hypertrempé à 1050°C/trempe à l'eau, electr. NaOH; (b) Structure du métal fondu, brut de soudage, passe de remplissage électrode enrobée, E 22 9 3L, electr. NaOH; (c) Structure du métal fondu, passe terminale, brut de soudage électrode enrobée, E 22 9 3L, electr. NaOH; (d) Structure du métal fondu, brut de soudage, passe de fond TIG, ER 22 9 3L, electr. NaOH; (e) Structure de la ZTA, sans précipitation ni austénite secondaire, electr. NaOH; (f) Structure de la ZTA de l'acier duplex à 22% Cr, avec austénite secondaire, electr. NaOH

de la microstructure Il est recommandé de prendre en considération les facteurs suivants:

- fort pouvoir de formation d austénite l'équivalent de $20 \times \%N$ (voir Fig. 2);
- L'azote influe sur l'indice de piqûration PRE suivant la formule suivante: $PRE_N = \% CR + 3,3\% Mo + 1,6\% N$;
- formation de nitrures, dans une matrice essentiellement ferritique On peut observer Cr_2N dans les grains ferritiques et/ou aux joints de grains lorsque la teneur en austénite est faible, c'est-à-dire dans la ZTA;
- porosité due à la sursaturation du métal fondu qui se solidifie. Le niveau de solubilité de l'azote dans ces types de métaux fondus dépend de la composition chimique totale, mais peut atteindre environ 0,35% N dans l'acier à 25,5% Cr-3, 7% Ni-2,3% Mo et 5,8% Mn et 0,2-0,3% N dans les nuances duplex et superduplex contenant 1-2% Mn;
- fixation et dégagement d azote. L'azote provenant du gaz de protection, dissocié dans l'arc, peut être activement dissous dans le métal fondu lorsqu'il se trouve sous son niveau de saturation.

Dans la pratique, pour allier le métal fondu avec de l'azote, on utilise des gaz de protection du type Ar + 2% ou 5% N₂ pour le soudage TIG de l'acier duplex en faible épaisseur.

L'azote présent dans le gaz de protection à l'envers (soit pur, soit en mélange) peut exercer un certain effet sur la teneur en azote du métal fondu de la passe de fond, notamment lorsque les dépôts contiennent plus de 0,20% N. Surtout dans le cas des aciers superduplex fortement chargés en azote, les passes de fond peuvent être protégées contre une perte de 0,01-0,05% N (à savoir une baisse du PRE_N de 0,16 à 0,80) lorsque les gaz de protection à l'endroit et à l'envers contiennent environ 5% d'azote. Selon la pression partielle de l'azote dans le gaz de protection, il est plus ou moins facile d'empêcher les pertes en azote du bain de fusion

Les fortes teneurs en azote dans le gaz de protection dégradent les électrodes de tungstène.

L'hydrogène dans le métal fondu en acier inoxydable duplex est responsable de la fissuration différée lorsque le métal fondu est chargé en hydrogène (par exemple une teneur supérieure à 4 ppm dans le métal fondu) a une structure essentiellement ferritique (FN > 85 = env. 60% de ferrite en volume) et lorsque des déformations se produisent et en présence d'une déformation plastique. Une déformation plastique de 5% seulement suffit à provoquer la fissuration [11].

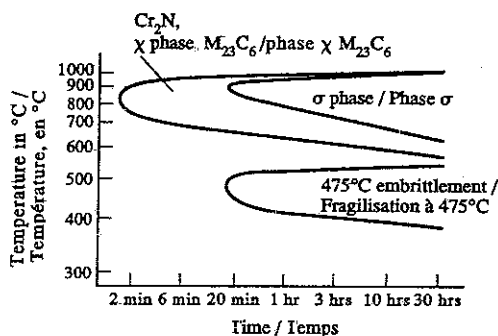


Fig 4. ITT diagram for parent material type 22% Cr duplex stainless steel (UNS 31803)/Diagrammes TTT du métal de base en acier duplex à 22% Cr (UNS 31803)

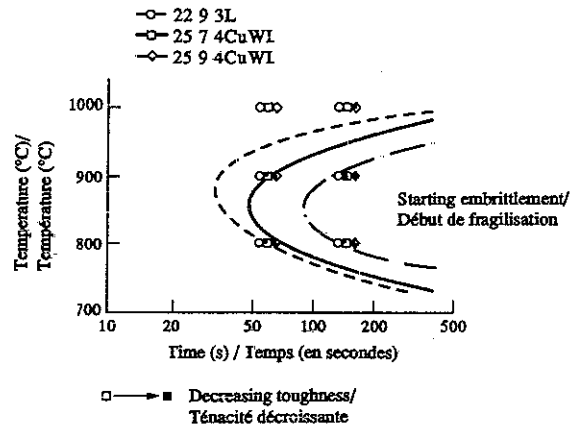


Fig. 5 Tentative TTT diagram for weld metal type E 25 9 4 Cu W L and E 22 9 3 L/Projet de diagramme TTT pour le métal fondu E 25 9 4 cu W L et E 22 9 3 L

Il faut éviter la présence d'hydrogène dans le gaz de protection à l'endroit. Les gaz de protection à l'envers contenant de l'hydrogène ne peuvent être utilisés que dans des conditions parfaitement maîtrisées (voir également la Section 4.2)

4. Soudage

4.1. Procédés de soudage

Suivant les impératifs technologiques et économiques, les procédés de soudage suivants peuvent être utilisés:

- soudage manuel avec électrodes enrobées
- soudage TIG
- soudage MIG-MAG
- soudage avec fil fourré
- soudage sous flux
- soudage au plasma.

Pour le soudage de tubes, il est de pratique courante d'exécuter la passe de fond en soudage TIG puis les passes de remplissage en soudage manuel avec électrodes enrobées, TIG ou MIG.

Les soudures bout à bout sur tôles sont exécutées en soudage avec électrodes enrobées, soudage sous flux ou avec fil fourré

Pour les réparations par soudage de pièces forgées et autres structures, on choisit généralement le soudage manuel avec électrodes enrobées

Le soudage au plasma s'emploie pour l'assemblage de faibles épaisseurs et pour l'exécution de la passe de fond en soudage longitudinal de tubes.

Lors du choix des procédés de soudage, les caractéristiques des procédés sont déterminantes. Ces caractéristiques sont présentées au Tableau 8.

Les procédés TIG, MIG, au plasma et avec fil fourré appliqués aux aciers duplex et superduplex sont des procédés sous protection gazeuse avec arc visible. Ils exigent une protection totale contre les effets de l'arc (protection de la vue, inhalation d'ozone).

Le soudage manuel avec électrodes enrobées et le soudage TIG sont les procédés les plus souples mais leur facteur

- N affects the pitting corrosion index PRE_N as $PRE_N = \%Cr + 3.3\%Mo + 16\%N$
- nitride formation, in a predominantly ferritic matrix Cr_2N can be observed in the ferrite grains and/or at grain boundaries when little austenite is present, i.e. in the HAZ.
- porosity, due to supersaturation of solidifying weld metal. The solubility level of N in these types of weld metal depends on the total chemical composition, but may be as high as $\sim 0.35\%$ N in 25.5% Cr, 3.7% Ni, 2.3% Mo and 5.8% Mn steel and 0.2–0.3% N in 1–2% Mn alloyed duplex and super-duplex grades.
- pick-up and emission of nitrogen. Nitrogen from the shielding gas, dissociated in the arc, can actively be dissolved in the weld metal when it is below its saturation level.

In practice, with the aim of alloying the weld metal with N shielding gases as Ar + 2% or 5% N_2 are used for GTA-welding of thin duplex material

Nitrogen present in the backing gas (whether in part or 100%) may show some effect on the root run weld metal nitrogen content, in particular with deposits with N-content $> 0.20\%$. Especially for high N-alloyed super-duplex stainless steel, root runs may be protected against a loss of 0.01–0.05% N (i.e. an effect of -0.16 to -0.80 in PRE_N) when backing and shielding gases contain approx. 5% N_2 . Depending on the N_2 partial pressure in the gas, loss of nitrogen from the molten pool is more or less effectively hindered

High nitrogen levels in the shielding gas cause degradation of tungsten electrodes.

Hydrogen in duplex stainless steel weld metal is responsible for delayed crack formation in those cases where the weld metal is charged with hydrogen (e.g. in fused metal > 4 ppm), has a predominantly ferritic structure (FN $> 85 =$ approx. 60 vol. % ferrite) and straining is applied. Only 5% plastic deformation has proved to be sufficient to produce cracking [11].

Hydrogen in the shielding gas must be avoided. Backing gas with hydrogen can be recommended only under fully controlled conditions (see also Section 4.2).

4. Welding procedures

4.1. Welding processes

Depending on process and economy related conditions, the following welding processes can be applied:

- SMAW Shielded Metal Arc Welding (welding with (MMA) covered electrodes)
- GTAW Gas Tungsten Arc Welding
- GMAW Gas Metal Arc Welding
- FCAW Flux Cored Arc Welding
- SAW Submerged Arc Welding
- PAW Plasma Arc Welding

For pipe welding, current practice involves root welding with GTAW, whereas completion of the weldment is carried out with SMAW (MMA), GTAW or GMAW. Butt welds in plate are carried out with SMAW (MMA), SAW or FCAW

For repair welding of castings and other structures, SMAW (MMA) is usually selected

PAW is applied in thin section welding and root runs in longitudinal pipe welding. In selecting the welding process

process characteristics are determining (The main factors are listed in Table 8.)

GTAW, GMAW, FCAW and PAW, applied to duplex and super-duplex stainless steels, are gas shielded open arc welding processes. Full protection for arc radiation (eyes, ozone inhalation) is required.

SMAW and GTAW are the most versatile processes, but the welder's duty cycle is lowest (15–25%), whereas other manual processes achieve higher levels (20–40%). Only mechanized/automated processes achieve duty cycles $> 50\%$.

Fume emission from the arc area, in particular when open arc processes are applied, including air-borne metal and non-metallic particles, require protection of human breathing systems and environment.

Weld metal deposition rates vary between zero (GTAW without filler supply) and approx. 6 kg/h (SAW)

Filler material shall be used in weldments, including the root run. Root runs can be made without filler material, only if postweld solution annealing will be applied

4.2. Welding consumables

4.2.1 Filler materials

The standardization of welding consumables designed for welding duplex and super-duplex stainless steel is limited. In this guide, reference can only be made to the following drafts of national and international standards or working documents for covered electrodes:

- AWS A 5.4-92
- AWS A5.9-93
- CEN (TC121 prEN.)
- IIW (Subcomm IIE, doc. II-E-118-91)

These drafts refer primarily to the all-weld metal properties

A summary of identifications with their corresponding limits for chemical composition and mechanical properties is given in Table 9.

Welding consumables for duplex and super-duplex stainless steel grades are manufactured and marketed by most leading welding consumable manufacturers. Appendix 1 provides an overview of available products.

Covered electrodes are available with a rutile or basic covering. Basic electrodes are somewhat easier for all position welding but rutile (sometimes called rutile/basic) electrodes perform well in almost all practical applications.

Weld metal deposits, obtained with filler wires applied in the other welding processes (GTAW, GMAW, SAW), have similar chemical compositions.

For application in welded structures intended for service in the as-welded condition, weld metal is overalloyed, compared to the parent material. This is to assure a balanced ferrite/austenite ratio. The all-weld metal deposit in the as-welded condition must have a composition producing a ferritic matrix in which the austenitic phase (at a level of FN30–70) has been formed homogeneously, directly after solidification. A weld metal composition which matches the parent material (Ni = 5.5–7.0%) is selected when the weldment is to be annealed at 1050–1100°C. In this procedure, the originally predominantly ferritic matrix transforms to a balanced ferritic/austenitic duplex structure.

Table 8. Welding process characteristics/ Tableau 8. Caractéristiques des procédés de soudage

Process/Procédé	Characteristics/Caractéristiques
SMAW (MMA)/Manuel avec électrode enrobée	Readily available. all positions slag on weld surface to be removed. low deposition rate/ Procédé très courant toutes positions, laitier à éliminer faibles vitesses de dépôt
GTAW/TIG	Requires good skill. most suitable for pipe welding high effect of dilution in root runs low déposition rate. can be mechanized/automated, i.e. orbital welding systems/Exige de l'habileté, convient très bien pour les tubes forte dilution dans la passe de fond. faibles vitesses de dépôt automatisable (soudage orbital)
GMAW/MIG-MAG	Requires good skill. more set-up work metal transfer depends on wire quality (spattering), commonly only for filling of joints high deposition rate can be mechanized/ automated/Exige de l'habileté préparation plus soignée. le transfert de métal dépend de la qualité du fil (projections), couramment utilisé pour les passes de remplissage. grandes vitesses de dépôt automatisable
FCAW/Soudage avec fil fourré	Limited availability of consumables only for filling of joints limited positional welding high deposition rate. slag protection/Produits d'apport moins disponibles, uniquement pour passes de remplissage peu de possibilités en soudage en position grandes vitesses de dépôt, protection par le laitier
SAW/Soudage sous flux	Only mechanized, requires set-up arrangements. only downhand (flat) welding high dilution affects weld properties, highest deposition rate. slag removal in joint may be difficult/Toujours mécanisé, exige d'importants préparatifs, uniquement soudage à plat forte dilution affectant les propriétés des soudures vitesses de dépôt maximales laitier parfois difficile à éliminer
PAW/Soudage au plasma	Requires complex equipment only mechanized welding, no filler metal added: plate composition determines weld properties. high welding speed/Exige un matériel complexe uniquement soudage automatique, pas de produit d'apport: c'est uniquement la composition du métal de base qui détermine les propriétés des soudures, grande vitesse de soudage.

d'utilisation est le plus faible (15-25%); d'autres procédés manuels ont des facteurs d'utilisation atteignant 20-40%. Seuls les procédés mécanisés ou automatisés permettent d'atteindre des facteurs de marche supérieurs à 50%.

Les émissions de fumées dans la zone de l'arc (notamment en soudage avec arc visible) et les aérosols métalliques et non métalliques exigent une protection du système respiratoire des soudeurs et une protection de l'environnement

Les vitesses de dépôt de métal varient de zéro (soudage TIG sans métal d'apport) à environ 6 kg/h (soudage sous flux)

Un métal d'apport doit être utilisé, y compris pour les passes de fond. Ces dernières ne peuvent être exécutées sans métal d'apport que si une hypotrempe est appliquée après soudage.

4.2. Produits consommables

4.2.1. Produits d'apport

La normalisation des produits consommables destinés au soudage des aciers duplex et superduplex est limitée. Dans le présent Guide, il ne peut être fait référence qu'aux projets de normes nationales ou internationales ou aux documents de travail suivants, concernant les électrodes enrobées:

- AWS A 5 4-92
- AWS A 5 9-93
- CEN (TC 121 GI3, doc. N151)
- IIS (Sous-Commission II-E, doc. II-E-118-91)

Ces projets se rapportent essentiellement aux propriétés du métal fondu non dilué

Un résumé des désignations avec leurs limites respectives en ce qui concerne la composition chimique et les propriétés mécaniques est présenté au Tableau 9

Les produits d'apport pour le soudage des aciers duplex et superduplex sont commercialisés par la plupart des grands fabricants de produits consommables. L'Annexe 1 donne une vue d'ensemble des produits disponibles

Les électrodes enrobées sont disponibles avec un enrobage basique ou au rutile. Les électrodes basiques sont un peu plus faciles à utiliser en toutes positions mais les électrodes au rutile (parfois appelées rutilo-basiques) ont un comportement satisfaisant dans presque toutes les applications pratiques.

Les métaux fondus obtenus avec les fils d'apport utilisés dans les autres procédés (TIG, MIG, sous flux) ont des compositions chimiques similaires.

Dans les structures soudées destinées à être mises en service à l'état brut de soudage, le métal fondu est plus chargé en éléments d'alliage que le métal de base. Ceci permet d'obtenir un bon rapport entre la ferrite et l'austénite. Le métal fondu non dilué à l'état brut de soudage doit avoir une composition donnant une matrice ferritique dans laquelle la phase austénitique (avec un FN de 30-70) s'est formée de façon homogène, aussitôt après solidification. On choisit une composition de métal fondu comparable à celle du métal de base (Ni = 5,5-7,0%) lorsque l'assemblage soudé doit être recuit à 1050-1100°C. Grâce à cette méthode, la matrice qui était essentiellement ferritique à l'origine, se transforme en structure duplex austéno-ferritique équilibrée.

Un réchauffage ultérieur par les passes de soudage peut produire une plus grande quantité d'austénite à partir de la ferrite (austénite secondaire), mais d'autres phases telles que la phase sigma ou chi peuvent également se former [12].

4.2.2. Gaz de protection à l'endroit et à l'envers

Les gaz destinés à protéger l'endroit et l'envers des soudures sont présentés au Tableau 10.

Table 9. Chemical composition and mechanical properties, specified for all weld metal samples/ Tableau 9. Compositions chimiques et propriétés mécaniques spécifiées pour le métal fondu non dilué

Process/Standard/ Procédé/Norme	Chemical composition wt%/Composition chimique % en poids							Mechanical properties/ Propriétés mécaniques					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Other/Autres	Rp0.2 (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A5/A4 (%)	
SMAW (covered electrodes)/Avec électrode enrobée													
AWS 5.4-92													
— E2209-XX	min		0.5		21.5	8.5	2.5	0.08					
	max	0.04	2.0	0.90	23.5	10.5	3.5	0.20	0.75				
— E2253-XX	min		0.5		24.0	6.5	2.9	0.10	1.5				
	max	0.06	1.5	1.0	27.0	8.5	3.9	0.25	2.5				
CEN													
— E2293L	min				21.0	8.0	2.5	0.08			450	550	20
	max	0.04	2.5	1.2	24.0	10.5	4.0	0.2	0.75				
— E2572	min				24.0	6.0	1.0						
	max	0.08	2.0	1.2	28.0	8.0	3.0	0.20	0.75				
— E2593CuL	min				24.0	7.5	2.5	0.10	1.5		550	620	18
	max	0.04	2.5	1.2	27.0	10.5	4.0	0.25	3.5				
— E2594L	min				24.0	8.0	2.5	0.20			550	620	18
	max	0.04	2.5	1.2	27.0	10.5	4.5	0.30	1.5	W:1.0			
GTAW/GMAW/SAW welding wire/Fil TIG MIG sous flux													
AWS 5.9-93													
— ER2209	min		0.50		21.5	7.5	2.5	0.08					
	max	0.03	2.0	0.90	23.5	9.5	3.5	0.20	0.75				
— ER2553	min				24.0	4.5	2.9	0.10	1.5				
	max	0.04	1.5	1.0	27.0	6.5	3.9	0.25	2.5				

Further reheating by subsequent weld runs may form more austenite from ferrite (secondary austenite), but other phases as sigma and chi-phase may precipitate as well [12]

4.2.2. Shielding and backing gases

Shielding gases suitable for the various gas shielded processes are listed in Table 10.

Backing gases for internal protection of one sided welded pipes can be either industrial pure argon (Ar 99.996%) or high purity nitrogen (99.996%). Some manufacturers recommend the use of "Formier" gas with 90% N₂ + 10% H₂ as backing gas. The advantages include improved prevention against oxidation and improved weld appearance (better wetting). A warning concerns the presence of hydrogen which, if picked up by the shielding gas, may embrittle weldments containing high ferrite levels.

In all cases, gases shall be dry (prEN 439: all gases except CO₂ moisture max. 40 ppm, dew point max. -50°C; CO₂: moisture max. 200 ppm, dew point max. -35°C). Precautions shall be taken to avoid moisture penetration into the gas; usage of gas tight tubes (high quality rubber tubes or metal piping) is recommended.

The volume of the area to be purged shall be limited. For this purpose, special clamping systems and close-in systems are available.

Shielding and backing gas have an influence on the nitrogen content of the weld metal. Emission of N₂ from the weld pool, due to the low N₂ partial pressure in the protecting gas, may take place, giving a decrease up to 0.05% N. Where critical, shielding and backing gas with 5% N₂ must be applied to prevent loss of nitrogen from the weld metal.

4.3 Joint preparation

Weldments in plate, pipes, fittings, etc. require a joint preparation suitable for the selected welding processes and plate thickness. A selection of joint preparations is shown in Table 11.

4.4 Welding in practice

In welding duplex and super-duplex stainless steel, considerations valid for standard stainless steel are most relevant. They include:

- similar joint preparation and cleaning;
- prevention of arc strikes outside the joint;
- allowance for high workpiece displacements due to shrinking or distortion effects;
- prevention of overheating of in particular root zones and thin sections by limiting the interpass temperature and heat input;
- protection of weld and parent material against excessive oxidation;
- prevention of residual slag and excessive oxidation on the side exposed to the corrosive environment.

Weld metal shall fulfil a FN (Ferrite Number) requirement of FN = 30–100 (approximately 22–70%) in GTA weldments. With other processes and at locations exposed to the corrosive environment and/or where diffusible hydrogen and strain may initiate hydrogen cracking, restriction to FN = 30–85 (approximately 22–60%) may be required. Higher ferrite contents are usually associated with low toughness. Single bead remelted parent material, or similar conditions, depending on parent material dilution may show a higher FN level (FN > 100). Postweld annealing is usually applied when very high ferrite levels can not be prevented in the as-welded condition (e.g. longitudinal pipe welds).

Table 10. Shielding gases (depending on recommendation of the manufacturer)/Tableau 10. Gaz de protection (tenir compte des recommandations des fabricants)

Welding process/ Procédé	Gas types/ Types de gaz
GTAW/TIG	Ar 99,996%* Ar + 2% N ₂ † Ar + 5% N ₂ †
GMAW/MIG-MAG	Ar + 1% O ₂ Ar + 30% He + 1% O ₂ Ar + 2% CO ₂ Ar + 15% He + 2% CO ₂
FCAW/Avec fil fourré	Ar + 1% O ₂ Ar + 20% CO ₂ Ar + 2% CO ₂ CO ₂
PAW/Plasma	Ar 99,996%*

*Quality II DIN 32526/Qualité II DIN 32526

†See also Section 3 5/Voir aussi la Section 3 5

Les gaz destinés à la protection de l'intérieur des tubes soudés d'un seul côté peuvent être soit de l'argon industriellement pur (Ar 99,996%) soit de l'azote de haute pureté (99,996%). Certains fabricants recommandent l'emploi de "Gaz de formage" composés de 90% d'azote et 10% d'hydrogène. Parmi les avantages que procurent ces gaz, nous pouvons citer une meilleure prévention contre l'oxydation et un plus bel aspect des soudures (grâce à un meilleur mouillage). Il convient toutefois de ne pas négliger la présence d'hydrogène qui risque de fragiliser les assemblages soudés à forte teneur en ferrite.

Dans tous les cas, les gaz doivent être secs (prEN 439: tous les gaz, sauf mélanges CO₂: humidité maximale 40 ppm, point de rosée -50°C maxi; CO₂: humidité maximale 200 ppm, point de rosée -35°C maxi). Des précautions doivent être prises pour éviter l'intrusion d'humidité dans le gaz; il est recommandé d'employer des canalisations étanches (tubes en métal ou en caoutchouc de haute qualité).

Le volume de la zone à purger doit être limité. A cet effet, il existe des systèmes spéciaux de serrage et de cloisonnement.

Les gaz de protection à l'endroit et à l'envers influent sur la teneur en azote dans le métal fondu. Une émission d'azote en provenance du bain de fusion due à la faible pression partielle d'azote dans le gaz de protection peut se produire, et entraîner une réduction d'azote pouvant atteindre 0,05%. Lorsque les circonstances l'exigent, on peut utiliser un gaz de protection (endroit ou envers) contenant 5% d'azote afin d'éviter toute perte d'azote dans le métal fondu.

4.3. Préparation des joints

Les assemblages soudés exécutés sur des tôles, des tubes, raccords, etc. exigent une préparation de joint adaptée aux procédés de soudage et à l'épaisseur des pièces. Des exemples de préparations sont présentés au Tableau 11.

4.4. Exécution du soudage

Pour le soudage des aciers duplex et superduplex on prend généralement les mêmes mesures que pour le soudage des aciers inoxydables classiques, notamment:

- même préparation des joints et même nettoyage;
- éviter les morsures d'arc hors du joint;
- prévoir d'importants mouvements de la pièce, dus au retrait ou aux déformations;
- éviter les surchauffes, notamment de la racine et sur les faibles épaisseurs, en limitant les températures entre passes et l'apport d'énergie;

- protéger le métal fondu et le métal de base contre une oxydation excessive;
- éviter le laitier résiduel et l'oxydation excessive sur la surface exposée au milieu corrosif.

Le métal fondu non dilué doit satisfaire aux exigences d'un indice de ferrite FN = 30-100 (environ 22-70%). Une limitation à FN = 30-85 (environ 22-60%) peut être exigée aux endroits exposés à un milieu corrosif et/ou lorsque l'hydrogène diffusible et les déformations peuvent provoquer la fissuration à froid. Le métal de base refondu par un cordon unique, ou des conditions comparables dépendant de la dilution du métal de base, peuvent présenter un indice de ferrite plus élevé (FN > 100). Un recuit après soudage est habituellement appliqué lorsque de très fortes teneurs en ferrite à l'état brut de soudage sont inévitables (par exemple: soudures longitudinales sur tubes).

Des soudures saines peuvent très bien être produites avec plusieurs procédés utilisés simultanément.

Les variables essentielles sont les suivantes:

- produit consommable
- préparation du joint
- position de soudage
- réglage du courant (dévidage du fil), tension, polarité
- énergie de soudage
- nature du gaz de protection
- température de préchauffage et entre passes

Pour le choix des produits consommables, il est nécessaire de consulter la documentation fournie par les fabricants. Les recommandations relatives aux aciers duplex reprennent les principes généraux présentés au Tableau 12.

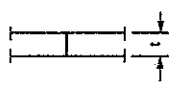




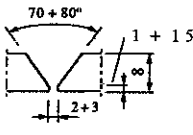



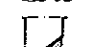



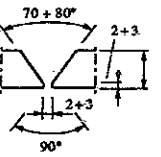



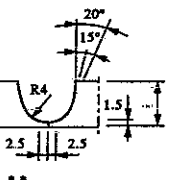



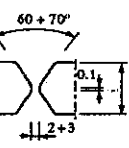



Certains procédés de soudage peuvent présenter des limites en ce qui concerne les positions de soudage.

Le réglage des paramètres doit s'effectuer dans les limites indiquées par le fabricant de produits consommables.

Le préchauffage des aciers duplex et superduplex n'est pas exigé, sauf lorsque des effets de bridage sévère sur des structures à fortes teneurs en ferrite (soudure, ZTA) peuvent provoquer la fissuration (par l'hydrogène). Dans de tels cas, un préchauffage jusqu'à 150°C est recommandé. Pour les aciers duplex à 23% Cr sans Mo et duplex à 22% Cr, la température entre passes ne doit pas dépasser 200°C. Pour les nuances duplex et superduplex à 25% Cr, elle ne doit pas dépasser 150°C, une température maximale de 100°C étant recommandée pour obtenir des propriétés optimales pour le métal fondu. Lorsqu'une hypertexte doit être appliquée après soudage, les températures entre passes n'ont aucune limite particulière.

Il est nécessaire d'accorder une attention particulière aux aspects critiques liés au chauffage lors du soudage. L'assemblage soudé doit être réalisé avec une bonne séquence des passes afin d'éviter les défauts de soudures et une exposition excessive des zones thermiquement affectées aux températures élevées. Tout défaut, ou structure comportant de nombreux produits de transformation, peut dégrader les caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion. En particulier, lors du réchauffage de la structure austéno-ferritique avec de longues expositions (> 1 minute) à des températures de 800-1000°C, les zones thermiquement affectées du métal de base et le métal fondu peuvent être le siège d'une formation de phases intermétalliques (sigma, chi) et d'autres phases telles que les nitrides.

Table 11. Joint Preparation and weld geometry [12]/Tableau 11. Exemples de préparations de joints [12]

Pipe/ Tubes	Plate/ Tôles	Joint / material thickness / Epaisseur du joint ou du matériau	Welding sequence / position / Séquence / Position de soudage	Welding processes / Procédés								
				SMAW/ electrode covered	GTAW/ TIG*	GMAW/ MIG MAG	FCAW/ Fl fluxé	SAW/ Sous flux	PAW/ Plasma			
X	X	2-5 mm 	One side / D'un seul côté	1G-6G 1  2-3 		X					X	
			Both sides / Des 2 côtés	1G-3G 1  2-3 	X	X	X	X				
X	X	V 3-10mm 	One side / D'un seul côté	1G-6G 1  2 	X	X						X
			3-top/ De la 3e passe à la dernière	1G 	X	X	X	X	X			
			3-top/ De la 3e passe à la dernière	2G-6G 	X	X	X	X				
			Both sides / Des 2 côtés	1G-3G 1  2-top  -Back 	X	(X)	X	X				
	X	V 3-10 	Both sides / Des 2 côtés	1G-3G 1  2-top  -Back 	X	(X)	X	X	X			
X		U >10 	One side / D'un seul côté	1G-6G 1  2  3-top 		X						
	X	X >10 	Both sides / Des 2 côtés	1G-3G 1-2  2-top, side A  2-top, side B 	X	(X)	X	X			X	
					X	X	X	X	X			

*GIAW + filler material supply/IIG + métal d'apport.

**In manual GTA welding a gap width of 1-2 mm may be preferred

Table 12. Welding consumable grade selection (all welding processes)/Tableau 12. Choix des produits consommables pour le soudage (par tous procédés)

Welding consumable CEN classification/Produits consommable classif CEN	Steel grade 23% Cr Mo-free duplex/Acier duplex à 23% Cr sans Mo	22% Cr duplex/Acier duplex à 22% Cr	25% Cr duplex/Acier duplex à 25% Cr Cu free/Sans Cu	Cu: 1.0-2.5% / Cu: 1.0-2.5%	25% Cr super-duplex/Acier à 25% Cr
22 9 3 L	+	+			
25 7 2			+		
25 9 3 Cu L			(+)†	+	
25 9 4 L		+	+	+	+

*Not for welded structures for HNO₃ service /Sauf pour structures soudées pour service avec HNO₃

†Depends on required minimum CPT /Dépend de la Température Critique de Piqûration minimale exigée.

En particulier, les zones de soudures de faible épaisseur et les parois des tubes ne doivent pas être surchauffées. L'énergie de l'arc doit être choisie en fonction de l'épaisseur du matériau à souder.

Une technique de soudage en passes froides comportant une passe de fond avec des paramètres de soudage normaux (apport d'énergie: 1,2-2.0 kJ/mm) suivie d'une ou deux passes avec énergie modérée (1.5 kJ/mm maxi) s'est révélée efficace pour prévenir l'exposition prolongée de la passe de fond et la ZTA correspondante (voir la Section 3.3) [12]. Cette méthode convient très bien pour le soudage des tubes par un seul côté.

4.5. *Traitements thermiques après soudage*

Les structures soudées sont, de préférence, mises en service à l'état brut de soudage. Les assemblages soudés qui sont fortement déformés ou détériorés par suite de transformations de phases défavorables se traduisant par une faible résistance à la corrosion et une faible ductilité doivent être hypotremptés. Les aciers duplex à 23% Cr sans Mo ou à 22% Cr doivent être traités à 1050-1100°C, alors que les nuances duplex et superduplex à 25% Cr exigent un recuit entre 1070 et 1120°C [13]. Les températures doivent être choisies dans la limite supérieure pour des assemblages soudés dont le métal fondu est plus chargé en éléments d'alliage (Ni = 8-10%) Le

Table 13. Weld metal properties; weldments in 22% Cr duplex stainless steel type; typical values [12, 14]/Tableau 13. Propriétés du métal fondu; assemblages soudés en acier duplex (à 22% Cr; valeurs typiques) [12, 14]

Process/Procédé	SMAW/Avec électrode enrobée	GTAW/TIG	SAW/Sous flux (aluminium fluoride)
Consumables classification/Classifs des produits consommables	22 9 3 LR	22 9 3 L	Wire: 22 9 3L/flux: AF Fil 22 9 3L/flux AF (fluorure d Al)
Type of weld/dimensions/ Type de soudure/dimensions	Girth weld U-prep / Soudure circonf prép en U U-prep ; t = 50 mm/ Prép en U; e = 50 mm	Girth weld U-prep / Soudure circonf prép en U U-prep ; t = 50 mm/ Prép en U; e = 50 mm	Plate butt weld/ Soudure bout à bout sur tôle ½ V-prep.; t = 25 mm/ Prép ½ V; e = 50 mm
Chemical composition wt %/Composition chimiques, % en poids			
C	0.021	0.015	0.025
Cr	22.9	22.5	23.1
Ni	9.6	8.4	8.5
Mo	3.1	3.0	3.0
N	0.12	0.12	0.09
PRE _N *	35.0	34.3	34.4
Ferrite/Ferrite FN	40-50	55-65	60-70
Mechanical properties/Propriétés mécaniques			
Condition/Etat	As-welded/Brut de soudage	As-welded/Brut de soudage	As-welded/Brut de soudage
Rp 0.2 (N/mm ²)	645	668	535
Rm (N/mm ²)	791	810	740
A5 (%)	18	20	36
CVN (J/-20°C)	45-61	113-146	41-60
CTOD (mm/-20°C)	0.27-0.31	0.80-0.95	n.d.
HV10	242-317	242-285	256-322
HRc	22-24	18-23	18-24
Corrosion properties ASTM G48A*/Tenue à la corrosion ASTM G48A*			
CPT/TCP °C	> 24	20-30	> 24

*Weld surface cleaned, cross-sections machined and ground to 500 mesh; followed by pickling and passivation /Surface de soudure nettoyée, sections transversales usinées et meulées à 500 mesh, puis décapées et passivées

†TCP = Température Critique de Piqûration

Table 14. Weld metal properties; weldments in 25% Cr super-duplex stainless steel; typical values [12]/Tableau 14. Propriétés du métal fondu; assemblages soudés en acier superduplex à 25% Cr; valeurs typiques [12]

Process/Procédé Consumables classification/Classifs des produits consommables	SMAW/Avec électrode enrobée 25 9 4 CuW LB	GTAW/TIG 25 9 4 CuW L	SAW/Sous flux Wire: 25 9 4 CuW L/flux: AF (aluminium fluoride) Fil 25 9 4 CuW L/flux AF (fluorure d'Al)
Type of weld/dimensions/ Type de soudure/dimensions	Plate butt weld/Soudure bout à bout sur tôle ½ V-prep.; t = 20 mm/ Prép ½ V; e = 20 mm	Plate butt weld/Soudure bout à bout sur tôle ½ V-prep.; t = 13 mm/ Prép ½ V; e = 13 mm	Plate butt weld/Soudure bout à bout sur tôle ½ V-prep.; t = 20 mm/ Prép ½ V; e = 20 mm
Chemical composition wt %/Composition chimiques % en poids			
C	0.03	0.024	0.025
Cr	25.1	24.8	25.0
Ni	9.8	9.8	9.2
Mo	3.7	3.7	3.7
N	0.22	0.22	0.20
PRE _N *	40.8	40.5	40.4
Ferrite/Ferrite FN	40-50	40-50	50-60
Mechanical properties/Propriétés mécaniques			
Condition/État	As-welded/Brut de soudage	As-welded/Brut de soudage	As-welded/Brut de soudage
Rp 0.2 (N/mm ²)	740	680	715
Rm (N/mm ²)	920	885	895
A5 (%)	25	26	25
CVN (J/-20°C)	57-68	78-96	44-52
(-40°C)	40-44	57-71	38-46
CTOD (mm/-10°C)	0.29-0.31	0.30-0.34	0.24-0.24
HV10	290-330	300-330	285-330
HRC	18-25	24-26	25-31
Corrosion properties ASTM G48A*/Tenue à la corrosion ASTM G48A*			
CPT/TCP† (°C)	> 40	> 40	> 40

*Weld surface cleaned cross-sections machined and ground to 500 mesh; followed by pickling and passivation /Surface de soudure nettoyée sections transversales usinées et meulées à 500 mesh. puis décapées et passivées

†TCP = Température Critique de Piqûration

Sound weldments may very well be produced with more than one welding process.

Essential variables in the welding procedure in a given material are:

- welding consumable
- joint preparation
- welding position
- setting of current (wire feed speed), voltage, polarity
- heat input
- shielding gas type
- preheat and interpass temperature.

Selection of welding consumables requires consultation of the manufacturer's product documentation. These recommendations relative to the duplex steel grade follow the general principles shown in Table 12.

Welding processes may have limitations in welding positions.

Setting of welding parameters shall be within the limits as published by the consumable manufacturer

Preheating of duplex and super-duplex material is not required except where heavy restraint on high ferrite containing structures (weld, HAZ) may cause (hydrogen-induced) cracking. In such cases preheating up to 150°C is recommended. For 23% Cr Mo-free duplex and 22% Cr duplex the interpass temperature shall be max. 200°C. For 25% Cr duplex and super-duplex steel grades the interpass temperature shall not exceed 150°C, a maximum of 100°C is recommended for optimal weld metal properties. In cases

where postweld solution annealing will be applied, no limitations in interpass temperatures are required.

Critical heating aspects in welding procedures shall receive special attention

The weldment shall be carried out in a sequence of weld runs under sound conditions to avoid weld defects and excessive exposure of heat affected zones to high temperatures. Any defect or structures with a high level of transformation products may cause deterioration of mechanical properties and corrosion resistance. In particular when reheating with long (> 1 min) exposure of the ferrite/austenite structure in a temperature range of 800-1000°C, heat affected zones in the parent and weld metal may show formation of intermetallic phases (sigma, chi) and other phases such as nitrides.

In particular, thin weld areas and pipe wall zones shall not be overheated. Arc energy must be selected relative to the material composition and thickness involved. A "cold pass technique" including a root pass with normal welding parameters (heat input 1.2-2.0 kJ/mm) followed by one or two runs with limited heat input (max 1.5 kJ/mm) proved to be successful in preventing long time exposure of the root run and associated HAZ (see Section 3.3) [12]. This method is successfully applied for one side welding of pipes.

The possible consequences of reheating due to repair welding must be recognized.

Table 15. Applications of duplex and super-duplex welded structures in various segments of industry/Tableau 15. Structures soudées en aciers duplex et superduplex dans divers secteurs industriels

Industrial segment/Secteur industriel	Steel grades 23% Cr, Mo free/Aciers duplex à 23% Cr sans Mo PRE _N ~ 25	22% Cr duplex/Duplex à 22% Cr PRE _N 30-36	25% Cr duplex/Duplex à 25% Cr PRE _N 32-40	25% Cr super-duplex/ Superduplex à 25% Cr PRE _N > 40
Chemical process/Génie chimique	Piping/Tuyauteries	Pumps fans centrifuges sulphur melting coils chemical tankers/Pompes ventilateurs centrifugeuses serpentins de fusion de soufre citernes	Urea strippers and reactors agitators/Colonnes de fractionnement et réacteurs d'urée agitateurs	Salt evap. tubing/ Tuyauteries d'évap. de sel
Petrochemical/Pétrochimie	Tubular reactors with C steel shell/Réacteurs tubulaires à enveloppe en acier au C	Desalting desulphurization and distillation units/Unités de dessalement désulfuration et distillation	Desulphurization equipment pump casings/ Matériel de désulfuration corps de pompes	Tubes and pipes Cl ⁻ or HCl environments/Tubes pour environnements Cl ⁻ ou HCl
Pulp and paper/Pâte à papier	Digesters preheaters and evaporators/digesteurs préchauffeurs et évaporateurs	Sulphate and sulphite plant digesters/Digesteurs pour sulfate et sulfite	Digesters and digester preheaters/Digesteurs et préchauffeurs de digesteurs	Chloride cont. bleaching equipment/Matériels de blanchiment avec chlorures
Power generation (nuclear fossil)/Production d'énergie (nucléaire ou à combustibles fossiles)	Reheaters.. feed water heaters/Réchauffeurs réchauffeurs d'eau d'alimentation	High velocity injection pipe in geothermal wells/Tuyaux d'injection rapide de puits géothermiques	Heat exchangers and systems in geothermal conditions or saline brines/ Echangeurs de chaleur et systèmes utilisés en conditions géothermiques ou dans la saumure	
Oil and gas (on- and offshore)/Pétrole et gaz (en mer ou à terre)	Coolers piping flow lines tensioning systems/ Refroidisseurs tuyauteries conduites d'écoulement systèmes tendeurs	Flare boom framework slotted oil liners (H ₂ S + CO ₂)/Structures de torchères, liners perforés (H ₂ S + CO ₂)	Sour gas transportation pumps seawater injection pumps diving bells/Pompes de transport de gaz acides pompes d'injection d'eau de mer cloches à plongeurs	Seawater cooling systems fire water piping proc equipm pumps separator pressure vessels. Xmas tree valve blocks/Systèmes de refroidissement à eau de mer. tuyauteries d'eau d'incendie, pompes récipients à pression pour séparateurs, soupapes de têtes d'éruption

chauffage doit être aussi rapide que possible, et le recuit doit être immédiatement suivi de la trempe à l'eau. C'est le chauffage par induction qui est le plus efficace.

La durée de séjour à la température de recuit est de 5 à 30 minutes; elle doit être suffisante pour restaurer l'équilibre des phases, y compris la mise en solution des phases intermétalliques (sigma et chi, notamment).

Les aciers duplex et superduplex se déforment facilement aux températures de recuit. Il convient d'accorder une attention particulière à la préservation des dimensions de la pièce traitée.

Ces aciers s'oxydent fortement. Il faut envisager l'emploi d'une atmosphère inerte.

4.6 Nettoyage et passivation

Les méthodes de nettoyage utilisées pour les aciers inoxydables classiques conviennent bien, par exemple l'élimination du laitier résiduel par un meulage fin. Le nettoyage à la brosse rotative ne doit pas être utilisé, à cause de la détérioration excessive de la surface (fines crevasses).

Les structures soudées ayant une surface de soudure lisse mais légèrement oxydée ou contaminée peuvent être efficacement nettoyées avec des pâtes ou des liquides de décapage du type courant. Les instructions des fabricants doivent être

observées. Il convient de veiller à ce que le produit de décapage soit complètement éliminé après le traitement.

La passivation des structures soudées ne doit être effectuée que si ce traitement peut être suivi d'un rinçage complet. La solution de passivation contient 20% HNO₃ en volume.

5. Propriétés des assemblages soudés

5.1. Propriétés mécaniques

Les propriétés les plus caractéristiques d'un certain nombre d'assemblages soudés exécutés avec divers produits consommables et procédés de soudage ont été déterminées. Les Tableaux 13 et 14 présentent un résumé des résultats d'essais effectués sur des assemblages réalisés dans la pratique sur des épaisseurs comprises entre 12 et 50 mm [12, 14].

5.2. Tenue à la corrosion

La résistance des assemblages soudés vis-à-vis de la corrosion uniforme et de la corrosion sous tension est comparable à la résistance du métal de base. La tenue à la corrosion cavernueuse et par piqûres dépend beaucoup plus de la structure locale et est, de ce fait, inférieure dans le cas des joints soudés se trouvant à l'état brut de soudage.

4.5 Post weld heat treatment

By preference, welded structures are put in service in the 'as-welded' condition. Weldments highly strained or deteriorated due to detrimental phase transformations resulting in low corrosion resistance and low ductility, are to be solution-annealed. 23% Cr Mo-free and 22% Cr duplex stainless steel grades shall be heat treated at 1050–1100°C whereas the 25% Cr duplex and super-duplex grades require an annealing temperature in the range 1070–1120°C [13]. This higher end of the temperature ranges given shall be selected for weldments with overmatching weld metal composition (Ni = 8–10%). The heating shall be as fast as possible, and the annealing is immediately followed by water quenching. Most effective is inductive heating.

Duration at the annealing temperature shall be 5 to 30 minutes and shall be sufficient to restore phase equilibrium, including solution of intermetallic phases (sigma and chi phase in particular).

Duplex and super-duplex grades deform easily at the annealing temperature. Special attention is needed to maintain product dimensions.

The material oxidizes substantially. Application of an inert atmosphere shall be considered.

4.6 Cleaning and passivation

Standard stainless steel cleaning practice can be applied. This includes cleaning of welded joints from residual slag by fine grinding. Rotating brushing (power brushing) shall not be applied, due to excessive surface deterioration (fine crevices). Welded structures with a smooth weld surface, but lightly oxidized or contaminated, are successfully cleaned by pickling with common pickling pastes or liquids. Instructions of the manufacturers are to be followed. Attention shall be paid to complete removal of the pickling agent after treatment.

Passivation of welded structures shall only be carried out if the treatment can be followed by complete rinsing. The aqueous passivation solution contains 20 vol % HNO₃.

5. Properties of weldments

5.1 Mechanical properties

For a number of weldments, executed with various welding consumables and welding processes, characteristic properties have been determined. Tables 13 and 14 give a summary of test results in practical joints in material with 12–50 mm thickness [12, 14].

5.2 Corrosion properties

General corrosion and stress corrosion resistance of weldments are on a level similar to the parent material. Pitting and crevice corrosion resistance depend much more on local structure and are, consequently, lower for welded joints in the "as-welded" condition.

The reference corrosion test according to ASIM G48A, using 10% FeCl₃-6H₂O has been applied to specimens from weldments with all weld metal surfaces and a machined specimen cross-section exposed to the corrosion test medium. The test has limitations as the specimen preparation and test examination procedures may influence the result. Furthermore, the test conditions may not be directly relevant to real service conditions.

Numerous other corrosion tests at ambient pressure and in autoclaves, with and without measurements of electrochemical potential, have been executed. The following tests with weldments in regular duplex stainless steel showed satisfactory results in welded 22% Cr duplex stainless steel structures:

- U-bend tests and dynamic slow strain rate tests in 90 g/l NaCl solution, saturated with 1 bar CO₂ at 106°C: no stress corrosion at deformations below 25% [15];
- test loop, chlorinated natural seawater ~0.1 m/s, 7–18°C, 6 months: very little attack at intentionally defective welds [16];
- artificial seawater, 70°C, pitting potential $E_p = 350 \text{ mV}_{\text{H}}$ [17].

With super-duplex weldments, substantially higher corrosion resistance could be demonstrated:

- NACE TM 0177 at ambient and elevated temperatures (up to 90°C) and pressure $p = 16 \text{ bar}$, > 30 days at stress levels 0.9–1.1 of the proof strength: no stress corrosion [18];
- ASTM G36: 500 h at 150°C in 45% MgCl₂ at a stress of 262 N/mm²: no stress corrosion [19];
- ASTM G30: U bends at 80–110°C at pressures of 50–300 bar in different conditions as: CO₂ 52 bar, H₂S 0.25 bar, Cl⁻ 46000 ppm during 30 days: no stress corrosion [20];
- no sensitivity to pitting on the basis of electrochemical measurements in an aqueous solution with 50000 ppm Cl⁻, pH = 2 at 60°C [21];
- no susceptibility to crevice corrosion in seawater at 20°C, provided that the surface is properly treated [22];
- exposure of most super-duplex steels to heated seawater at up to 70°C does not appear to be a problem to fully wetted parts [23].

Limitations are indicated to be:

- using 4-point load tests, ASIM 639-73, 40% CaCl₂ solution at 100°C can cause stress corrosion cracking in low nitrogen 22% Cr duplex stainless steel, loaded at 75% of the yield strength [24];
- dynamic straining in acidified 3% NaCl solutions (pH 2) results in stress corrosion cracking (demonstrated for super-duplex stainless steel grades) [25];
- the critical partial pressure of H₂S at a stress of 1.0 × yield strength is 0.02 bar and the threshold stress at higher pressure of H₂S is 0.6 × yield strength in 5% NaCl (pH 4 by acetic acid) under 15 bar [26];
- cold deformation can decrease the stress corrosion cracking resistance [27].

6. Applications (examples)

Due to their favourable mechanical and corrosion properties, duplex and super-duplex stainless steel grades are applied in a wide scope of applications. In general the two main reasons are the higher strength properties for weight savings which reduce fabrication costs and enable lighter support structures to be used, and the higher corrosion resistance, in particular against stress corrosion cracking compared to standard stainless steel grades such as AISI 304L/316L resulting in a longer life-cycle.

In all industrial sectors heat exchangers made from various duplex stainless steel grades are in operation [28].

In Table 15, an attempt has been made to exemplify typical applications of the four main duplex stainless steel groups as defined above, specified for different areas of industry.

L'essai de corrosion de référence selon ASTM G48A effectué avec une solution à 10% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a été utilisé sur des éprouvettes prélevées dans des assemblages soudés ayant des surfaces en métal fondu non dilué et la section transversale usinée exposée au milieu corrosif. L'essai présente des limites liées au fait que la préparation des éprouvettes et les méthodes d'examen peuvent influencer sur les résultats. Par ailleurs, les conditions d'essai peuvent ne pas être directement transposables aux conditions réelles de service.

De nombreux autres essais de corrosion ont été exécutés à la pression ambiante et en autoclaves, avec et sans mesures du potentiel électrochimique. Les essais suivants effectués sur assemblages soudés en acier inoxydable duplex (à 22% Cr) du commerce ont donné des résultats satisfaisants:

- essais de pliage à 180 degrés, avec faible vitesse de déformation dynamique, en solution à 90 g/l NaCl saturée de CO_2 à 1 bar, à 106°C: pas de corrosion sous tension à des déformations inférieures à 25% [15];
- essais en solution 5% NaCl saturée de H_2S à 60°C pendant 14 jours: pas de piqûres [16];
- essais en eau de mer artificielle à 70°C, potentiel de piqûres $E_p = 350 \text{ mV}_H$ [17].

Avec des assemblages soudés en acier superduplex, une bien meilleure tenue à la corrosion a pu être observée:

- essais NACE TM 0177 à l'ambiante et à haute température (jusqu'à 90°C), pression de 16 bar, plus de 30 jours à des contraintes égales à 0,9–1,1 Re: pas de corrosion sous tension [18];
- essais ASTM G36: 500 h à 150°C dans 45% MgCl_2 sous une contrainte de 262 N/mm^2 : pas de corrosion sous tension [19];
- essais ASTM G30: pliages à 180 degrés à 80–110°C, pression de 50–300 bar dans différentes conditions: CO_2 52 bar, H_2S 0,25 bar, Cl^- 46000 ppm pendant 30 jours: pas de corrosion sous tension [20];
- pas de sensibilité aux piqûres sur la base de mesures électrochimiques dans une solution aqueuse contenant 50000 ppm Cl^- , $\text{ph} = 2$, à 60°C [21];
- pas de sensibilité à la corrosion cavernueuse dans l'eau de mer à 20°C, à condition que la surface soit correctement traitée [22];
- l'exposition de la plupart des aciers superduplex à de l'eau de mer chauffée jusqu'à 70°C ne semble pas poser de problèmes pour les pièces complètement émergées [23].

Parmi les limites, nous pouvons citer:

- les essais sous charge 4 points ASTM 639-73 en solution à 40% CaCl_2 à 100°C peuvent provoquer la corrosion

fissurante de l'acier duplex à 22% Cr et à faible teneur en azote, chargé à 75% de la limite d'élasticité [24];

- la déformation dynamique dans des solutions à 3% NaCl acidifiées ($\text{pH} = 2$) entraîne la corrosion fissurante (mise en évidence sur des aciers superduplex) [25];
- la déformation à froid peut réduire la résistance à la corrosion fissurante [26];
- la déformation à froid peut entraîner une diminution de la résistance à la corrosion sous tension [27].

6. Exemples d'applications

Compte tenu de leurs bonnes caractéristiques mécaniques et leur bonne tenue à la corrosion, les aciers inoxydables duplex et superduplex trouvent de nombreuses applications. En général, les deux principales raisons de leur plus grand succès par rapport aux aciers inoxydables classiques tels que AISI 304L ou 316L sont leur résistance mécanique supérieure qui permet des réductions de poids et de coûts de fabrication des structures soudées et leur meilleure tenue à la corrosion, notamment à la corrosion fissurante, qui se traduit par des durées de vie plus longues.

Dans tous les secteurs industriels, des échangeurs de chaleur construits en aciers inoxydables duplex sont en service [28].

Dans le Tableau 15, nous avons tenté de regrouper, par secteurs industriels, les exemples d'applications les plus typiques pour les quatre principaux groupes d'aciers duplex.

Remerciements

Les auteurs tiennent à adresser leurs remerciements au Comité de Coordination du Projet "Aciers Inoxydables Duplex" (phase 2) pour l'aide précieuse qu'il leur a apportée, ainsi qu'à MM. Rademakers et Vuik (IPL-TNO) et van Stiphout (Matcon).

L'édition de Mars 1992 du présent Guide comporte de nouvelles recommandations techniques et des améliorations proposées par les membres de la Sous-commission IX-H de l'IIS, et notamment des précisions importantes de la part du Dr T. Gooch et du Dr. Kotecki.

Les auteurs remercient également la Société Lincoln Norweld/Smitweld pour tout le temps et le matériel qu'elle a aimablement mis à leur disposition.

LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES DUPLEX ET SUPERDUPLEX

Appendix 1. Welding consumables from European manufacturers for welding duplex and super-duplex stainless steel grades/
Annexe 1. Produits consommables proposés par des fabricants Européens pour le soudage des aciers duplex et superduplex

Welding consumable manufacturer/ Fabricant	Process/Procédés	Filler material classification (according to CEN classification principles)/Classification des produits d'apport (selon CEN)		
		X 22 9 3 L	X 25 9 3 Cu L	X 25 9 4 L
Avesta	SMAW/Avec électrode enrobée	2205-PW		2507/P100
	GTAW/TIG	2205		2507
	GMAW/MIG-MAG	2205		2507
	SAW*/Sous flux*	2205		2507
Bohler	SMAW/Avec électrode enrobée	Fox CN 22/9N	Fox Duplex Cu	Fox CN 26/10 N†
	GTAW/TIG	CN 22/9-1G	3 0	
	GMAW/MIG-MAG	CN 22/9-1G		
	SAW*/Sous flux*	CN 22/9-UP		
ESAB	SMAW/Avec électrode enrobée	OK 67 50		OK 68 53
		OK 67 53		OK 68 55
	GTAW/TIG	OK Tigrod 16 86		OK Tigrod 16 88
	GMAW/MIG-MAG	OK Autorod 16.86		OK Autorod 16.88
	FCAW/Fil fourré	OK Tubrod 14 37		
Filarc	SMAW/Avec électrode enrobée	RS 22 9 3 LCN		RS 25 10.4 LCN
	GTAW/TIG	PZ 65 17		
	GMAW/MIG-MAG	PZ 60 17		
	SAW/Sous flux			
Messer Lincoln	SMAW/Avec électrode enrobée	Grinox 62	Grinox 63	
		Grinox 33	Grinox 37	
	GTAW/TIG	Grinox T-62		
	GMAW/MIG-MAG	Grinox S-62		
Metrode	SMAW/Avec électrode enrobée	Supermet 2205	Supermet 2507 Cu	Supermet 2507
		2205 KS		Zeron 100XKS‡
	GTAW/TIG	ER329N		Zeron 100X‡
	GMAW/MIG-MAG	ER329N		Zeron 100X‡
Sandvik	SMAW/Avec électrode enrobée	22 9-3 1 R		25 10 4 1 R
				25 10 4 1 B
	GTAW/TIG	22 8 3 L		25 10 4 1
	GMAW/MIG-MAG	22 8 3 L		25 10 4 1
Lincoln Smitweld	SMAW/Avec électrode enrobée	Arosta 4462	Jungo 4462 Cu	Jungo Zeron 100×
	GTAW/TIG	LNT 4462		LNT Zeron 100×‡
	GMAW/MIG-MAG	LNM 4462		LNM Zeron 100×‡
	FCAW/Fil fourré	Cor-A-Rosta 4462		
Soudometal	SMAW/Avec électrode enrobée	Soudinox S 4462	Soudinox S 52	Soudinox S 100
			Soudinox S 47	
	GTAW/TIG	Soudotig 22 9 3L		
	GMAW/MIG-MAG	Soudor G 22 9 3L		
TEW	SMAW/Avec électrode enrobée	Thermanit 22/09W		
		Thermanit 22/09		
	GTAW/TIG	22/09/SG		
	GMAW/MIG-MAG	22/09/SG		
Soudometal	SMAW/Avec électrode enrobée	22/09/UP		
	GTAW/TIG			
	GMAW/MIG-MAG			

*Filler wire in combination with appropriate flux Fil + flux approprié

†E 25 10 3 L

‡In addition also parent material matching composition/De plus métal de base de même composition.