

Comportement structural et mécanique des soudures en aciers inoxydables austénitiques et duplex réalisées par le procédé TIG

A. Kellai, A. Boutaghane, B. Boussiala, S. Kahla et S. Dehimi

Welding and Related Techniques Division

Research Center in Industrial Technologies CRTI, P.O.Box 64, Cheraga 16014, Algiers Algéria

a.kellai@csc.dz

Résumé — L'objet de cette étude étant de connaître les différentes variations structurales et mécaniques après un cycle thermique de soudage de deux aciers inoxydables de haute performance (austénitique AISI 316L et duplex AISI 2205), qui sont très utilisés dans tous les secteurs, particulièrement l'industrie pétrolière. On a utilisé le procédé TIG, c'est un procédé à arc électrique, caractérisé par son apport thermique intense et précis aisément automatisé, l'état microstructural des assemblages soudés a été analysés par des observations métallographique optique de différentes zones à savoir : la zone fondue ZF, la zone affectée thermiquement ZAT et le métal de base MB. Finalement les changements microstructuraux ont été argumentés par une filiation de micro-dureté.

Mots Clés — Acier inoxydable austénitique, duplex, soudage TIG, micro-dureté et contrôle.

I. INTRODUCTION

L'étude de la structure métallurgique des assemblages soudés en acier inoxydable et la connaissance approfondie des phénomènes intervenants par différents procédés de soudage, et les facteurs influençant son comportement, permet de prévenir des anomalies, choisir des conditions adaptées à son utilisation, et par la suite permet le développement des systèmes automatique de soudage et de contrôle.

La dénomination des aciers inoxydables est applicable à un ensemble d'alliages ferreux résistant à un grand nombre de milieux corrosifs, dans des limites étendues de températures, donc les aciers inoxydables ont en commun la propriété de résister, de façon plus ou moins grande selon la nuance, à la corrosion aqueuse en présence d'agents agressifs ou à haute température en milieux gazeux [1].

Les aciers austénitiques sont ductiles, résistants au choc et non-magnétiques, ils ne se trempent pas, mais peuvent acquérir une certaine dureté par déformation à froid. A l'état recuit, ils possèdent à ce moment une plus grande ductilité et

une meilleure ténacité que les aciers ordinaires. Ils possèdent une très bonne résistance à la corrosion.

Les aciers inoxydables duplex sont largement employés dans l'industrie d'une manière significative. Ils combinent à la fois une bonne résistance à la corrosion, une résistance mécanique élevée et une mise en œuvre aisée. Leurs propriétés physiques se situent entre celles des aciers inoxydables austénitiques et celles des aciers inoxydables ferritiques. La composition chimique des aciers duplex doit permettre l'équilibre des phases tout en évitant un écueil majeur : la formation, aux températures élevées de phases intermétalliques dommageables (les phases sigma et chi), qui précipitent préférentiellement dans la ferrite. L'addition d'azote en retarde significativement leur formation, il est essentiel que l'azote soit présent en quantité suffisante dans la solution solide [1, 2].

La soudabilité est la propriété d'un matériau qui permet, lorsqu'on emploie un procédé de soudage donne pour un but donné, d'obtenir un joint continu en appliquant un mode opératoire convenable. La soudure ainsi obtenue doit satisfaire aux exigences imposées, quand aux propriétés locales de la soudure, et à leur influence sur la construction, dont la soudure fait partie [1].

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Dans cette étude, on a utilisé l'acier inoxydable austénitique AISI 316L sous forme d'un tube de 8" de diamètre et 3.75 mm d'épaisseur et l'acier duplex AISI 2205 sous la forme d'un tube de 2" de diamètre et 5.54 mm d'épaisseur. Un soudage multi-passes a été employé en utilisant le procédé de soudage à l'arc avec électrode réfractaire de tungstène TIG, sous protection gazeuse à base d'argon Ar. La composition chimique des métaux de base et les métaux d'apports sont donnés dans le tableau I. Les paramètres de soudage utilisés dans ce travail sont répertoriés dans le tableau II.

TABLEAU I
COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ACIER INOXYDABLE AUSTENITIQUE AISI 316L, DUPLEX AISI 2205 ET METAUX D'APPORTS ER 316, ER 2209

Élément	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	N
AISI 316L	0.03	1.2	0.8	≤0.03	≤0.04	17.55	12.2	2.3	-
ER 316	0.02	1.7	0.5	-	-	18.5	12.3	2.6	-
AISI 2205	0.015	1.13	0.49	0.0005	0.026	22.15	5.33	3.18	0.17
ER 2209	0.02	1.60	0.46	0.01	0.01	23.00	8.6	3.1	0.16

TABLEAU II
PARAMETRES DE SOUDAGE

Métal de base	AISI 316L	AISI 2205
Electrode de Tungstène	EWTh2	EWTh2
Diamètre de fil Φ (mm)	2.4	2.4
Intensité (A)	75 - 85	90 - 120
Tension (V)	10 - 12	10 - 12
Nombre de passes	2	3
Vitesse de soudage (cm/mm)	7 - 10	3 - 8
Énergie de soudage (kJ/cm)	6.12 - 6.42	10.8 - 18
Température entre passes °C	150	150
Gaz de protection	Ar 99.999%	Ar 99.999%
Débit de gaz (l/mn)	12	12

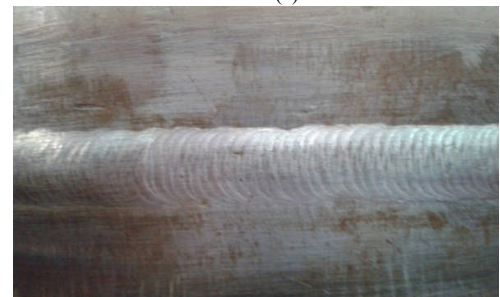
Les échantillons destinés à la caractérisation microstructurales sont des coupes transversales à la direction de soudage, en utilisant des techniques standard pour le polissage mécanique. Ensuite les échantillons sont attaqués chimiquement par une solution contenant 10 ml de HNO₃, 20 ml de glycérol et 30 ml d'HCl (Glyceregia). L'observation microstructural des échantillons a été effectuée à l'aide d'un microscope optique (NIKON ECLIPSE LV100ND). De plus l'acier duplex est attaqué électrolytiquement dans une solution 10N de KOH à un potentiel d'attaque de 3V pour 10 s.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les figures 1 et 2 montrent l'aspect visuel du joint de soudure, coté finition et coté pénétration, on constate une bonne soudure avec une largeur régulier le long du joint sans aucun défaut, ce qui prouve l'importance du procédé de soudage, paramètres de soudage, la qualification du soudeur et enfin la bonne soudabilité des aciers inoxydables.



(a)

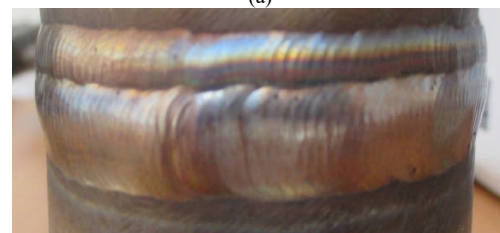


(b)

Fig. 1 Aspect visuel du cordon de soudure de l'inox austénitique 316L a) coté pénétration, b) coté finition



(a)



(b)

Fig. 2 Aspect visuel du cordon de soudure de l'inox duplex 2205 a) coté pénétration, b) coté finition

L'observation micrographique de l'acier inox 316L (figure 3.a) montre une structure austénitique, avec une grande densité de macles, la distribution des grains est uniforme, leur forme est polygonale ainsi que des petites plages de ferrite aux joint de grains. La micrographie de l'inox duplex 2205 représenté dans la figure 3.b, montre une structure biphasée en bandes fines orientées, de telles façons que la phase austénitique (γ) baignent dans une matrice de ferrite (α) [3, 4].

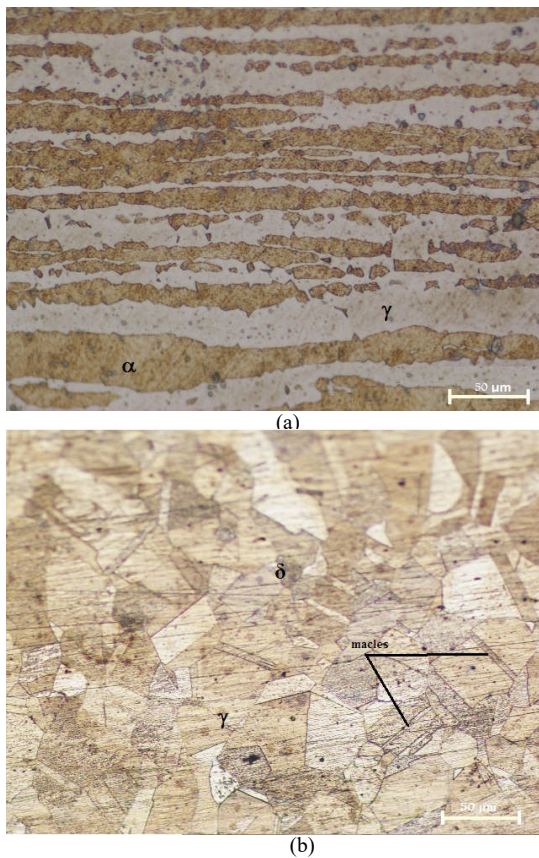


Fig. 3 Micrographie optique du métal de base a) AISI 316L, b) AISI 2205

La structure de la zone fondue pour l'inox 316L est très fine par rapport à la structure du métal de base (figure 4.a). Elle a un aspect dendritique de solidification, composée de deux phases, la phase austénitique (γ) et la phase ferritique (δ), ces dendrites confirment la croissance par épitaxie [5].

La figure 4.b montre une structure de solidification duplex caractérisée par de gros grains ferritiques, dans lesquels apparaît l'austénite sous différentes morphologies. Ce mode de solidification est accompagné d'une croissance épitaxiale avec les grains du métal de base à partir de la zone de liaison. La nature compétitive et épitaxiale de la croissance des grains ferritiques dans les soudures d'aciers duplex est l'un des facteurs responsables de la formation de

gros grains ferritiques [4]. Les différentes morphologies des grains d'austénite sont : l'austénite allotrimorphe au niveau des interfaces ferrite /ferrite, une structure widmanstätten et d'austénite intragranulaire, ces différentes formes d'austénite dues à la succession des passes dans la soudure, réalisée en trois passes, ce qui favorise la régénération structurale qui est elle-même responsable de la modification de la morphologie des grains d'austénite et de l'augmentation de la fraction volumique de l'austénite [3, 4]. Lors du refroidissement, l'austénite allotrimorphe se forme aux interfaces α/α à très haute température par un mécanisme de précipitation hétérogène. Au fur et à mesure que le refroidissement se poursuit l'austénite widmanstätten précipite aux interfaces α/α et dans les interfaces α/γ allotrimorphe déjà formée. Les grains d'austénite widmanstätten croissent selon des plans spécifiques de la matrice ferritique. Comparée à l'austénite widmanstätten, l'austénite intragranulaire précipite à des températures moins élevées dans la matrice ferritique [3, 6].

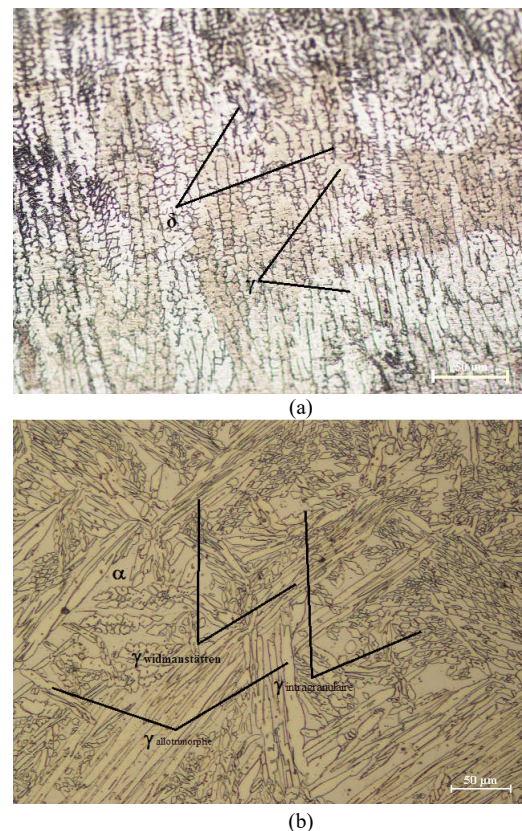


Fig. 4 Micrographie optique du métal fondu a) AISI 316L, b) AISI 2205

Cette micrographie (figure 5.a) correspond à la ZAT de l'inox 316L montre une structure grossière d'où des grains grosses, on constate que ces grains deviennent fins progressivement jusqu'à le métal de base, ce qui prouve que le

régime de refroidissement au niveau des zones du joint de soudure est différent [7].

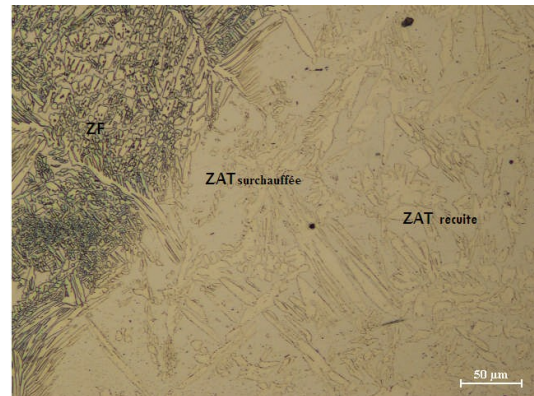
La microstructure de la ZAT présentée dans la figure 5.b correspond l'acier inox duplex 2205 est constituée de deux régions principales à savoir la zone de surchauffe, adjacente au métal fondu, et la zone de recuit partiel adjacente au métal de base. Dans la zone de surchauffe, où la température atteint des valeurs très élevées (1450 °C), la structure de l'acier, initialement biphasée, est portée jusqu'à l'état ferritique monophasé, au chauffage. Lors du refroidissement, l'austénite se reforme par une transformation à l'état solide aux interfaces ferrite/ferrite et dans les grains ferritiques. Lors du refroidissement rapide, la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ est incomplète, par conséquent on s'attend à obtenir des taux de ferrite élevés dans cette zone.

Dans la zone de surchauffe, l'austénite reformée prend les aspects suivants : l'Austénite allotrimorphe, l'austénite widmanstätten et l'austénite intragranulaire. Le taux de ferrite dans cette zone est de l'ordre de 65 à 70%, qui entraîne une dureté excessive et à la fragilisation en particulier à basse température [3, 4, 8].

Dans la zone recuite partiellement, les proportions relatives des deux phases en chaque point dépendent du niveau atteint par la température en ce point (800 à 1100 °C), pour cela cette zone est caractérisée par une faible recristallisation de la microstructure qui se traduit par une modification de la morphologie des grains des deux phases. Cette faible recristallisation est suivie par une légère croissance des grains particulièrement ceux de la phase ferritique, donc le pourcentage d'austénite a été augmenté 10%, en comparaison avec le métal de base, d'où le taux de l'austénite/ferrite est de l'ordre de 60:40 [3, 4].



(a)



(b)

Fig. 5 Micrographie optique de la ZAT a) AISI 316L, b) AISI 2205

Les valeurs de la dureté moyenne mesurées à différentes zones du cordon de soudure sont schématisées dans la figure 6. Nous constatons que la valeur de la dureté mesurée dans le métal de base est de l'ordre de 190 HV induite par la structure austénitique, on a aussi une augmentation de la dureté dans la ZAT (210 HV) induite par la structure grossière dû au mode de solidification et conditions de refroidissement. La dureté atteinte des valeurs max au niveau de la zone de liaison causées par les précipités de solidification. Finalement la zone fondue (ZF) caractérisée par des valeurs basses de l'ordre de 165 HV, Ceci est dû à la structure brute de solidification qui est dendritique, ainsi que la forte proportion de ferrite delta (δ).

Sur la même figure, on voit clairement une différence des valeurs obtenues pour l'acier duplex 2205, une dureté élevée au niveau de ZF (264 HV), une dureté un peu faible au métal de base (228 HV) et on atteint un seuil de dureté à la ZAT (270 HV). L'écart remarquable, due à la différence de morphologie et pourcentage des phases austénitiques/ferritiques, et à la composition chimique présent dans la pièce soudée, précisément dans chaque phases.

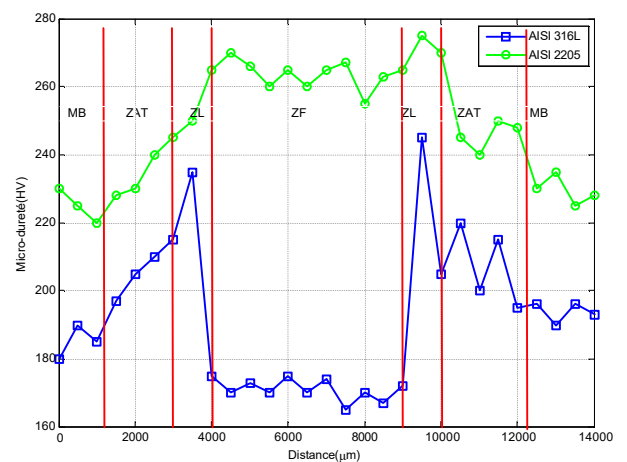


Fig.6 Filiation de micro-dureté à travers différentes zones de joint de soudure

IV. CONCLUSION

- Le refroidissement à l'air des Joints soudés (TIG) en acier inoxydable austénitique 316L et duplex 2205, en utilisant les paramètres de soudage actuels fournit un équilibre de phase satisfaisante et éviter les précipités intermétalliques fragiles.
- L'acier inox austénitique 316L caractérisé par : une zone fondue très fine par rapport à la structure du métal de base. Elle a un aspect dendritique de solidification, ces dendrites à base de la ferrite (δ), qui confirment la croissance par épitaxie. Une zone affectée thermiquement ZAT grossière dû au régime de refroidissement rapide.
- La microstructure de la zone fondue de l'acier inox duplex 2205 révèle trois formes différentes de la phase austénitique: allotriomorphe aux joints de grains, structure de widmanstätten et particules d'austénite intragranulaire. Une ZAT constituée de deux régions principales à savoir la zone de surchauffe, adjacente au métal fondu, et la zone de recuit partiel adjacente au métal de base.
- Le comportement mécanique de deux acier interprété par la micro-dureté est presque la même, sauf au niveau de la zone fondue où les valeurs sont supérieures dans l'acier duplex 2205 par rapport à différentes zones. Due à la différence de morphologie et pourcentage des phases austénitiques/ferritiques, et à la composition chimique présentent dans la pièce soudée, précisément dans chaque phases, inversement remarqué sur l'acier inox austénitique 316L. Ceci est dû à la structure brute de solidification qui est dendritique, ainsi que la forte proportion de ferrite delta (δ).

REFERENCES

- [1] Claude PHILIP, "Soudage des aciers inoxydable", Revue d'Arts et Métiers Paristech, Bordeaux 2006.
- [2] Thomas Christiansen et Marcel A. J. Somers, "Caractérisation de l'acier inoxydable après trempe superficielle à basse température", Revue de Matérialographie Struers 9, 2006.
- [3] A. Vinoth Jebaraj, L. Ajaykumar, "Influence of microstructural changes on impact toughness of weldment and base metal of duplex stainless steel AISI 2205 for low temperature applications", International Conference On Design and Manufacturin, Procedia engineering, India 2013, pp. 456-466.
- [4] R. Badji, "Influence des traitements thermiques à haute température sur l'évolution de la texture et de la microstructure des soudures d'acier inoxydable duplex 2205", thèse de doctorat, ENP juin 2008.
- [5] M.HOFMANS, J.MATHNET, H.MATHY et R.SALKIN, "Cours de métallurgie de soudage. Institut Belge de la soudure - Bruxelles 72.
- [6] E. Henry, "Caractérisation mécanique et étude des mécanismes de vieillissement thermique et thermomécanique de l'acier inoxydable martensitique 15-5PH, soudé par faisceau d'électrons", thèse de doctorat, Toulouse, Décembre 2006.
- [7] BERTRAND CHASSINGOLE, "Influence de la structure métallurgique des soudures en acier inoxydables austénitiques sur le contrôle non destructif par ultrason", Thèse de Doctorat, Lyon 2000.
- [8] P.M. AJITH, P. SATHIYA, S. ARAVINDAN, "Characterization of microstructure, toughness, and chemical composition of friction-welded joints of UNS S32205 duplex stainless steel", India, Springer 2014 pp.82-91.