

Fatigue properties estimation based on hardness measurements and tensile properties of a dissimilar weld joint

**Kheireddine Bettahar¹, Amine Brik-chaouch¹, Ahcene Mokhtari¹
Nacer Tala-ighil¹, Mabrouk Bouabdallah², Mohamed Gaceb³**

¹ CRTI, Research center in industrial technologies ex CSC, B. P. 64, Cheraga, Algiers, Algeria

² LGSDS, École Nationale Polytechnique, 10 Avenue Hassan Badi, BP 182, El Harrach, Algeria

³ LFEPM, Faculté des hydrocarbures et de la chimie (UMBB), Algeria

Abstract

This work aims to estimate the high cycle fatigue properties of a dissimilar weld joint made of 2205 duplex and 13% Cr supermartensitic stainless steels. The filler metal used is the 2507 superduplex stainless steel. Two methods were used; one is a direct method that consists of experimental fatigue tests conducted under rotating bending conditions. The other method is an indirect method where the fatigue properties are estimated by means of empirical expressions based on hardness measurements and tensile properties such as Young modulus and tensile strength. Results show that for high cycle fatigue regime, the overall behavior of the dissimilar weld joint is controlled by the weld metal that has the lowest fatigue limit. The two base materials have the same level of fatigue limit which is slightly higher than that of the weld metal. A good agreement was obtained between the two used methods for the two base materials in contrast with the weld metal.

Keywords

Dissimilar weld joint; fatigue ; duplex ; supermartensitique ; superduplex

1 Introduction

Les propriétés mécaniques sont étroitement liées aux propriétés structurales. Toutes hétérogénéités structurales locales induisent inévitablement une hétérogénéité des propriétés mécaniques ce qui se répercute sur le comportement global des assemblages soit en sollicitations statiques ou cycliques. Le soudage hétérogène est l'une des solutions qui ont pour but d'adapter en plus les propriétés des matériaux aux conditions de service, mais ils présentent la particularité d'associer au sein du même joint de soudure une variété de microstructures [1,2]. Dans la combinaison des aciers inoxydables Duplex (DSS)/Superduplex (métal d'apport SDSS) / Supermartensitique (SMSS) on trouve la structure en bande biphasé qui est spécifique aux aciers duplex, la structure dendritique qui caractérise la zone fondue et la structure de martensite en lath qui caractérise les supermartensitique, en plus de deux différentes zones affectées thermiquement [3,4]. Plusieurs techniques ont été développées pour la détermination des propriétés locales des zones miniatures pour les soudures telles que la zone fondue et la zone affectée par la

chaleur. Parmi ces techniques de caractérisation, on peut citer : les micro-éprouvettes de traction, les cartographies de dureté, la mesure des champs de déformation par corrélation d'image numérique.... La résistance à la fatigue est l'une des caractéristiques mécaniques primordiales à déterminer pour les assemblages soudés, du fait qu'elle provoque des dommages périlleux et inopinés [5-7]. En raison du temps et du coût considérable que nécessitent les essais de fatigue, des modèles empiriques ont été développés pour l'établissement des courbes d'endurance à partir des mesures de dureté et des propriétés de traction monotone. Parmi ces modèles: R&F (Direct hardness method) [8], MUS (Modified universal slopes method), MMitch (Modified Mitchell's method), UML (Uniform material law) [9-10]. Toutes ces méthodes sont basées sur la détermination des coefficients de l'équation (1), connue sous le nom de (Coffin–Manson–Basquin) équation [10] :

$$\Delta\varepsilon/2 = \Delta\varepsilon_e/2 + \Delta\varepsilon_p/2 = (\sigma'f/E) \times (2N)^b + \varepsilon'f \times (2N)^c \quad (1)$$

Cette équation est considérée comme une solution pour la détermination du comportement en fatigue à grande ou à faible durées de vie. Elle est constituée de deux termes : le premier terme est appelé partie élastique dominante et le second est appelé partie plastique dominante. Le domaine de fatigue à grand nombre de cycles est gouverné par le premier terme (partie élastique dominante), les coefficients propres à cette partie sont $\sigma'f$ et b qui sont connues aussi sous le nom de coefficients de Basquin [10].

Dans ce travail, la soudure hétérogène étudiée ainsi que ces propriétés structurales et mécaniques déterminées sont présentés. Le lien entre les propriétés en sollicitations statique et cyclique est établi à l'aide de modèles empiriques et les durées locales et globales de la soudure hétérogène en comparaison avec les essais expérimentaux sont estimées.

2 Matériel et méthodes

Les matériaux qui constituent la soudure hétérogène étudiée sont l'acier inoxydable duplex 2205, l'acier inoxydable super-duplex (métal d'apport) et l'acier inoxydable supermartensitique. Ils ont été livrés sous forme de tubes d'un diamètre extérieur de 170 mm et d'une épaisseur de 12 mm (figure 1). La figure 1a montre le schéma du chanfrein du joint soudé. Le soudage des deux tubes a été effectué avec le procédé TIG (Tungsten Inert Gas). Leur composition chimique des matériaux est donnée par le tableau 1.

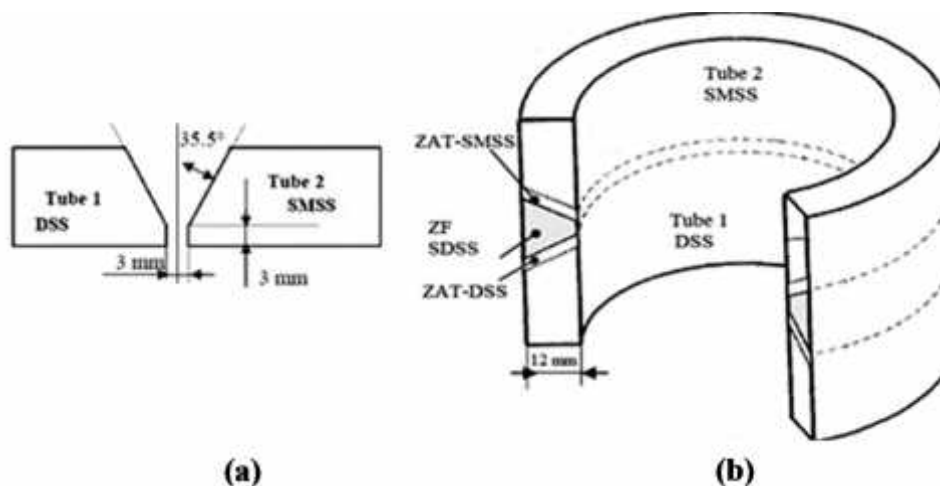


Figure 1 : Schéma du chanfrein (a) et du tube soudé (b).

Tableau 1: Composition chimique massique des matériaux de base DSS/SMSS et de la zone fondue ZF.

Eléments	Cr	Ni	C	Mn	P	S	Cu	Mo	N	Si	Ti	Nb	Al	W
DSS	22.4	6.9	0.021	0.48	0.022	0.0007	0.61	3.65	0.25	0.49	-	-	-	0.64
ZF	25.1	6.7	0.020	-	-	-	0.50	3.50	0.30	0.40	-	-	-	2.00
SMSS	13.0	7.0	0.015	1.00	0.020	0.0050	0.25	2.50	0.01	0.05	0.15	0.05	0.055	-

Des investigations ont été préalablement effectuées en vue de déterminer les caractéristiques microstructurales et mécaniques [3]. Concernant le protocole expérimental adopté pour les essais mécaniques de traction et de fatigue à grand nombre de cycles, il consistés à caractériser les deux matériaux de base et la zone fondue. Les propriétés de traction ont été obtenues avec des micro-éprouvettes prélevées dans chaque zone. Pour les essais de dureté (HB10), les moyennes des mesures prises par zone ont été enregistrées. Ces investigations ont révélées d'importantes hétérogénéités structurales et mécaniques à travers le joint soudé.

3 Résultats et discussion

3.1 Propriétés structurale et mécanique à travers de joint soudé

Le matériau de base duplex (DSS) se caractérise principalement par une structure en bande avec des proportions de fraction volumique approximativement égale de ferrite et d'austénite, tandis que le matériau de base supermartensitique (SMSS) se caractérise par une structure fine de martensite en lath avec une proportion d'austénite résiduel atteignant les 20 % environs. Les deux zones affectées thermiquement (ZAT), présentent des structures totalement différentes. La ZAT-DSS est constituée de deux sous-zones, une sous-zone de surchauffe plus proche de la zone fondue et une sous-zone de recuis partielle. La ZAT-SMSS est constituée de quatre sous-zone principales qui sont les produits de deux types de transformation structurale: ceux se produisant lors du soudage à haute température et ceux se produisant à faible température. Les résultats des essais mécaniques sont consignés dans les tableaux 2et 3. Il apparait clairement d'après l'histogramme de la figure 2 et les deux tableaux 2 et 3 que le joint soudé présente une hétérogénéité locale des propriétés mécaniques.

Tableau 2: Caractéristiques de traction des matériaux de base et de la zone fondue [3]

Propriétés de traction	DSS	ZF	SMSS
Module de Young (GPa)	202	231	215
Limite élastique (0,2%) (MPa)	520	650	600
Limite à la rupture (MPa)	750	820	705
Allongement (%)	30	23	17,5

Tableau3: Dureté moyenne des différentes zones du joint soudé

Dureté moyenne (HRB10)				
DSS	Zone critique			SMSS
	ZAT-DSS	ZF	ZAT-SMSS	
230	245	255	270	243
Moyenne (257)				

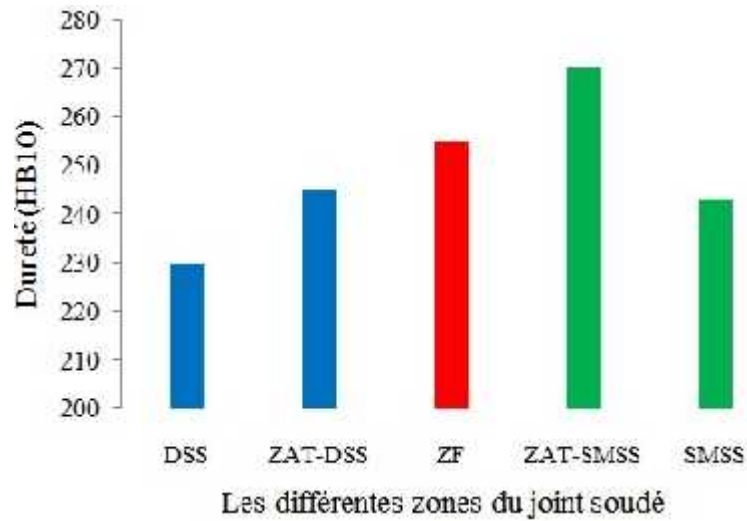


Figure 2 : Dureté des différentes zones du joint soudé

Pour les essais de fatigue, le nombre de cycle choisi comme critère d'arrêt a été de 5×10^6 cycles conformément à l'Euro-code 3 [11]. La figure 2 montre les tendances des courbes d'endurance ajustés à partir des données expérimentales selon la loi de puissance ($y = a \times x^b$). Les paramètres a et b représente respectivement les deux coefficients σ'_f et b obtenues expérimentalement par ajustement (Tableau 4).

Table 4: Paramètres expérimentaux de fatigue à grand nombre de cycles des matériaux de base et de la zone fondue.

DSS		ZF		SMSS	
σ'_f	b	σ'_f	b	σ'_f	b
849,67	-0,069	1301,55	-0,108	1000,80	-0,080

Il a été constaté qu'à 5×10^6 cycles, les endurances des matériaux de base DSS et SMSS sont sensiblement proche avoisinant les 300 MPa, celle de la zone fondue est de 50 MPa plus faible.

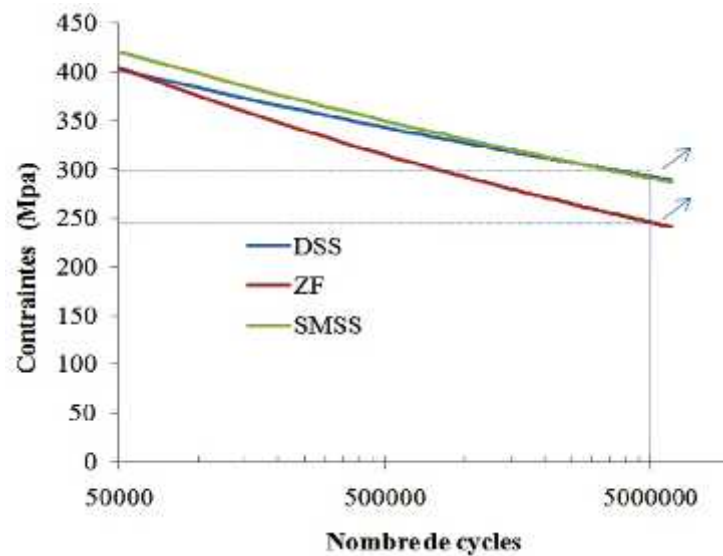


Figure 3 : Courbes d'endurances expérimentales des matériaux de base et de la zone fondue [3].

3.2 Estimation des propriétés de fatigue à grand nombre de cycles

Comme cette étude s'intéresse au domaine de fatigue à grand nombre de cycles, les deux paramètres qui nous intéressent sont : le coefficient de résistance à la fatigue (f') et l'exposant de résistance à la fatigue (b), se sont les deux paramètres caractéristiques du premier terme de l'équation de B-C-M [10]. Ces deux paramètres sont donnés par des expressions analytiques en fonction de la dureté et les propriétés de traction. Le tableau 5 présente les modèles des expressions analytiques adoptées et le tableau 6 présente les valeurs numériques correspondantes.

Tableau 5 : Expressions des propriétés obtenues par différentes méthodes

	Méthodes	f'	b
R&F	Direct hardness method (Rossel & Fatemi) [8]	$4,25 \text{ HB} + 225$	-0,09
MUS	Modified Universal Slope method (Muralidharan-Manson) [9]	$E^{0,623} (\sigma_u/E)^{0,832}$	-0,09
Mitch	Mitchell's model [9]	R_m^{*345}	$-1/6 * \text{Log} [2(\sigma_u^{*345}) / \sigma_u]$
UML	Uniform Material Law (Baumel-Seeger) [9]	$1,5 * R_m$	-0,087

Tableau 6: Propriétés de fatigue à grand nombre de cycles obtenues pour les matériaux de base et la zone fondue

	DSS		ZF		SMSS	
	f'	b	f'	b	f'	b
Expérimental	849,67	-0,069	1301,55	-0,108	1000,80	-0,080
R&F	1202,50	-0,090	1308,75	-0,090	1257,75	-0,090
MUS	1192,31	-0,090	1328,54	-0,090	1155,01	-0,090
Mitch	1095,00	-0,078	1165,00	-0,079	1050,00	-0,076
UML	1125,00	-0,087	1230,00	-0,087	1057,50	-0,087

L'avantage de ces modèles empirique est qu'ils ne nécessitent que le module d'élasticité, la résistance à la traction et la dureté Brinell comme données d'entrées. Ce type de modèle permet le passage des propriétés en sollicitations statique aux propriétés en sollicitations cyclique. On note que la dureté est la traction sont elle-même reliées par des relations analytique avec une un très bon rapport de corrélation [8].

La figure 4 montre les courbes d'endurances expérimentales et les courbes estimées, les courbes expérimentales sont positionnées au plus bas niveau par rapport aux courbes obtenues à partir des modèles. Ce fait laisse suggérer que pour les mêmes durées de vies, les contraintes cycliques réelles appliquées sont inférieures à celles estimées par les modèles. Ceci peut avoir comme origine l'effet de concertation de contraintes au niveau de l'épaulement des éprouvettes de fatigue, ce facteur n'est pas pris en charge par les modèles. Les contraintes au niveau de l'épaulement sont plus élevées par rapport au reste de la section active de l'éprouvette. De plus, pour des durées de vies plus faibles (inférieur à 10^4 cycles) la courbe d'endurance expérimentale relative à la zone fondue se rapproche de plus en plus des deux matériaux de bases duplex et supermartensitique. Pour des charges cycliques élevées, (dans notre cas pour des charges voisines de 400 MPa) la zone fondue et les deux matériaux de base se comportent de manière relativement similaire. Cela peut vouloir dire que la soudure se comporte de manière différente dans les deux domaines de fatigue, à grands ou à faible nombre de cycles. A grand nombre de cycle la résistance à la fatigue est contrôlée par la zone fondue, elle est considérée comme maillon faible, tandis-que à faible durée de vie (domaine olygo-cyclique) le comportement tend à se rapprocher de celui des deux matériaux de bases (duplex et supermartensitique).

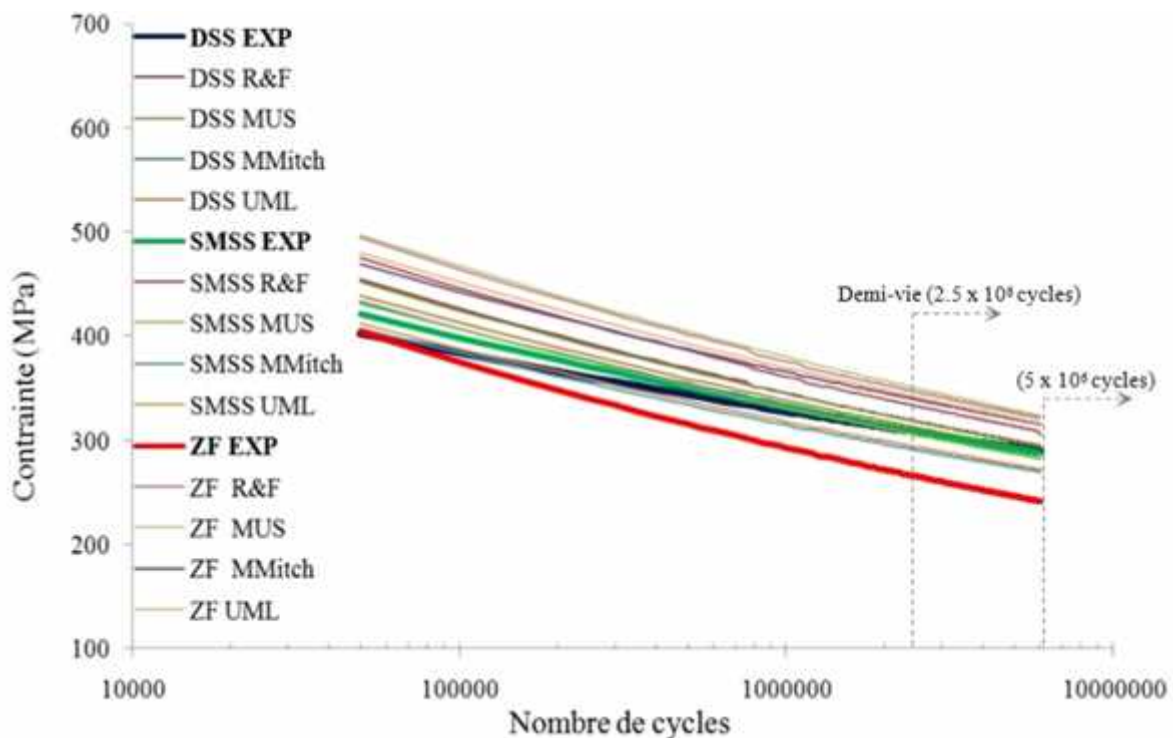


Figure 4: Résultats des courbes d'endurance estimées et Expérimentales

La figure 5 présente les ratios des valeurs des courbes d'endurances obtenues par les quatre modèles par rapport à ceux obtenues expérimentalement par les essais de fatigue. Pour les deux matériaux de base une bonne corrélation a été obtenue entre les courbes estimées et expérimentales, contrairement à la zone fondue qui a présenté une divergence. Cette

divergence entre les valeurs estimées et expérimentales pour la zone fondue peut être expliquée par sa nature dendritique brute de solidification. Les zones fondues sont considérées généralement qu'elles obéissent aux mêmes processus de solidification que les alliages moulés (castings). Le passage rapide de l'état liquide à l'état solide entraîne en générale des micro-ségrégations d'éléments d'additions, des microfissures ou même des inclusions non-métalliques. Tous ces facteurs affectent la résistance à la fatigue.

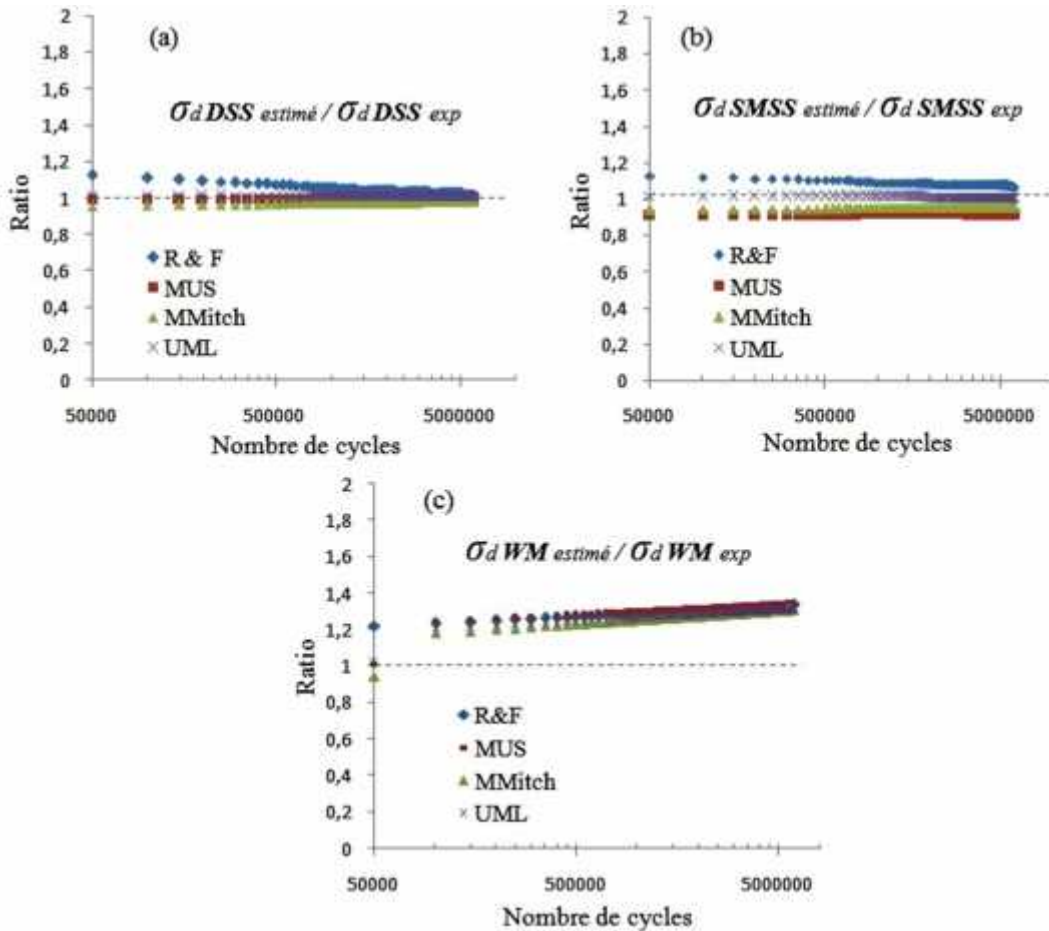


Figure 5: Rapport des résultats d'endurances (Estimées /Expérimentaux) des matériaux de base (a) et (b), et de la zone fondue (c).

En plus des contraintes résiduelles internes pouvant atteindre le niveau de la limite élastique qui une fois ajoutée aux contraintes cycliques, cela fait accroître considérablement l'amplitude de la contrainte équivalente appliquée. La restriction ici est que ces méthodes analytiques ont été validées pour des matériaux homogènes uniformes, et elles ne sont pas directement applicables aux zones fondues des soudures. A grand nombre de cycles, la rupture est produite par une micro-plasticité locale qui dépasse le seuil de résistance du matériau ce qui entraîne l'initiation des microfissures. La phase d'initiation représente 90 % de la durée de vie totale. Une fois les microfissures sont initiées, la propagation et la rupture totale parvient très rapidement.

4 Conclusion

La soudure étudiée (Duplex/Superduplex/ Supermartensitique) présente d'importantes hétérogénéités structurales. Une grande variété de structures est présente : structure en bande (DSS), structure martensitique (SMSS), structure dendritique (ZF) et les deux zones affectées thermiquement. Cette situation affecte le comportement global de la soudure suite à des sollicitations mécaniques.

Les modèles empiriques utilisés pour l'estimation des propriétés de fatigue et les essais de fatigue expérimentaux ont révélé que les deux matériaux de base DSS et SMSS sont situés approximativement au même niveau d'endurance (300 MPa) à 5×10^6 cycles, malgré la différence et l'hétérogénéité structurale qu'ils présentent. La zone fondue quant à elle présente une divergence entre les courbes estimées et expérimentales, en plus elle est considérée comme le maillon faible en sollicitation cyclique (la moins résistante en fatigue avec une endurance de 250 MPa).

Références

- [1] Lippold J C, Kotecki D J. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2005).
- [2] Papantoniou.V, *Welding stainless steel in shipbuilding*, National technical university of Athens, these, (2010).
- [3] K. Bettahar, M. Bouabdallah, R. Badji, M. Gaceb, C. Kahloun, B. Bacroix, Microstructure and mechanical behavior in dissimilar 13Cr/2205 stainless steel welded pipes. *Materials and Design* 85 (2015) 221–229
- [4] V. Olden, C. Thaulow, R. Johnsen: Modelling of hydrogen diffusion and hydrogen induced cracking in supermartensitic and duplex stainless steels, *Materials and Design* 29, 2008, 1934–1948.
- [5] Wolfgang F. Review Fatigue analysis of welded joints: state of development *Marine Structures*, 2003.
- [6] Nicholas T. High Cycle Fatigue A Mechanics of Materials Perspective, Air Force Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, Wright Patterson AFB, Ohio, USA Elsevier Ltd (2006)
- [7] Maddox S J. Key developments in fatigue design of welded constructions, TWI Ltd, Granta Park, Gt Abington, Cambridge, CB1 6AL, UK.
- [8] Roessle M L, Fatemi A, Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations. *International Journal of Fatigue* 22 (2000) 495–511
- [9] Hariharan K, Raghu V Prakash, Sathya Prasad M. Weighted error criterion to evaluate strain-fatigue life prediction methods, *International Journal of Fatigue* 33 (2011) 727–734
- [10] Jie Chen, Zihui Xia, A fatigue life prediction method for coke drum base, weld, and HAZ materials from tensile properties, *Materials and Design* 63 (2014) 575–583
- [11] Eurocode 3. Design of Steel Structures - Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. ENV 1993-1-1, April 1992.

Adresse de correspondance

BETTAHAR kheireddine. CRTI, Research center in industrial technologies ex CSC, B. P. 64, Cheraga, Algiers, Algeria. b_kheireddine@yahoo.fr