

LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

Le soudage par friction à l'outil (33) a été inventé par le TWI (34).

Le premier brevet a été déposé en décembre 1991 [10].

On peut maintenant considérer que c'est un progrès décisif dans l'assemblage des métaux et plus particulièrement des alliages d'aluminium.

Cette nouvelle technique de soudage a connu en moins de dix ans un important développement industriel dans plusieurs secteurs, dont la construction navale, l'aéronautique et le transport ferroviaire [11].

Depuis 1995, nombreuses ont été les publications et les conférences présentées sur les applications du soudage par malaxage FSW à la construction navale dans les conférences internationales sur les navires à grande vitesse en aluminium [12]. Ces publications traduisent bien l'intérêt que les architectes navals et les chantiers portent à cette nouvelle technique en passe de modifier très sensiblement la construction navale en aluminium et de lui communiquer un nouvel élan [13, 14]. (33) *Friction Stir Welding (FSW)*. (34) *TWI : The Welding Institute*.

1. Principe du soudage par friction malaxage

Le procédé est simple : il consiste à cisailer le métal, sans le fondre (il devient pâteux) au moyen d'un outil rotatif, le « pion », dont la hauteur est légèrement inférieure à celle du joint soudé. En tournant, il mélange le métal des pièces à assembler, le rejette à l'arrière où il y a plastification et forgeage du joint soudé, ainsi formé. L'écoulement du métal est facilité par l'échauffement provoqué par le frottement de l'épaulement (« shoulder ») sur la surface du métal. L'épaulement de diamètre supérieur à celui du pion contient les particules de métal en mouvement et il maintient une pression qui empêche l'éjection du métal hors de la zone soudée (figure 92). Compte tenu des efforts très importants sur les pièces, celles-ci doivent être fortement bridées sur le banc de la machine de soudage.

2. Microstructure du joint soudé par friction malaxage

Les propriétés spécifiques du joint soudé FSW s'expliquent par sa microstructure très différente de celle d'une soudure à l'arc (MIG ou TIG), du seul fait qu'il n'y a pas de phénomènes de fusion-solidification.

Sur le joint soudé FSW, on observe quatre zones bien distinctes (figure 93) [15] :

zone A, à l'extérieur du joint soudé, constituée de part et d'autre de la soudure du métal de base de chacun des éléments assemblés. Sa structure n'est pas du tout affectée par le soudage,

zone B, c'est la zone affectée thermiquement. Elle ne subit pas de déformation plastique. Comme pour la ZAT des joints soudés par les procédés classiques MIG ou TIG, on observe une diminution des caractéristiques mécaniques (figure 94). Cette zone subit un recuit pour les alliages à durcissement par écrouissage et un survenu pour les alliages à durcissement structural (35). Mais on n'observe pas de déformation, du fait que l'échauffement du métal et le niveau de température atteint sont beaucoup plus bas qu'avec les procédé de soudage à l'arc,

zone C, c'est la zone thermo-mécaniquement affectée qui a subi et une déformation plastique et un échauffement. La structure de cette zone dépend de plusieurs paramètres dont la nature de l'alliage, **zone D**, « le noyau » formé de grains recristallisés, dans lesquels sont dispersés les constituants métallurgiques des alliages de base. La taille des grains est généralement plus petite que celle des grains du métal de base. Cette structure est favorable à la tenue en fatigue du joint soudé.

Sur les alliages à durcissement structural, le noyau est dans un état proche de T4 (mise en solution, maturation à la température ambiante) (figure 95).

3. Comparaisons avec le soudage à l'arc

Ce procédé fonctionnant à une température inférieure au point de fusion du métal, il présente de nombreux avantages :

les conditions de mise en œuvre sont simplifiées : la préparation de surface est réduite au dégraissage. Quand une préparation des bords est nécessaire, un surfacage des chants suffit. Le soudage est effectué sans métal d'apport, et sans gaz protecteur,

les applications sont beaucoup plus étendues qu'avec le soudage à l'arc : il est possible d'assembler tous les alliages d'aluminium entre eux, que ce soit des produits moulés ou des demi-produits corroyés,

la qualité du joint soudé : il n'y a pas de risques de fissuration à chaud (36), ni de porosités du fait qu'il n'y a pas formation d'hydrogène (37),

(35) Par conséquent, les alliages se retrouvent dans l'état métallurgique indiqué précédemment.

(36) Il est possible de souder des alliages au cuivre (familles 2000 et 7000).

(37) S'il s'en formait, il ne serait pas dissous puisque la solubilité de l'hydrogène est nulle dans l'aluminium à l'état solide.

la qualité des assemblages: les déformations sont très réduites du fait du faible niveau de température et du soudage en milieu solide,

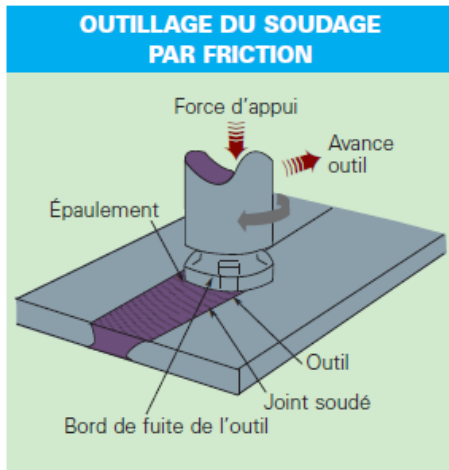


Figure 92

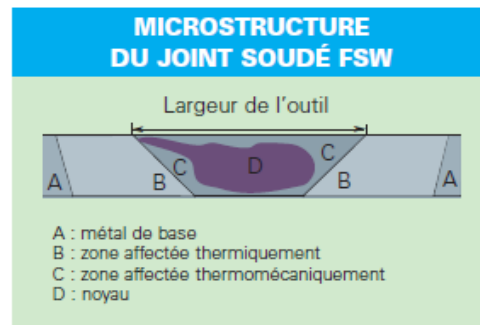


Figure 93

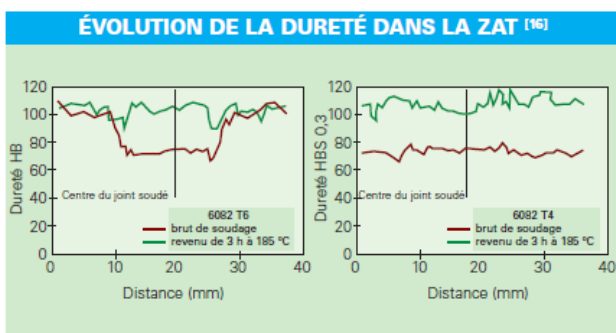


Figure 95

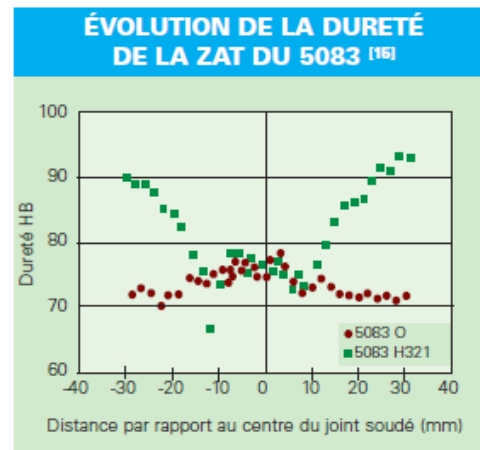


Figure 94

l'environnement et les conditions de travail ; il n'y a pas de fumée, pas de projections de particules de métal, ni d'émission d'ozone, ni de rayonnement ultraviolet. Ce procédé est économe en énergie, la puissance nécessaire est de l'ordre de 20 % des besoins du MIG.

Dans l'état actuel du développement industriel, ce procédé est bien adapté pour une production *en atelier* de sous-ensembles : sections de ponts, murailles, cloisons, etc. [17]. Ils seront ensuite montés sur les navires, et assemblés par les procédés de soudage classique, tel le MIG (38).

Récemment, un prototype de machine « portable » construit par l'Université d'Adélaïde en Australie avec The Welding Institute a été présenté [18]. Il s'agit en fait d'un outil couplé à un moteur hydraulique qui est monté sur un chariot pour le soudage sur la coque de navire de tôles d'épaisseur de 5 mm. Cependant, si l'outil est « portatif », les éléments à rabouter doivent être fixés fermement pour encaisser les efforts nécessaires au soudage.

4. Possibilités du soudage par friction malaxage

Dans l'état actuel de la technique, il est possible de souder des épaisseurs jusqu'à 25 mm.

Les résultats de recherches sur des alliages de la famille 6000 ont montré qu'il est possible d'aller jusqu'à 50 mm d'épaisseur avec une seule tête (figure 96), et à 75 mm avec deux têtes (figure 97). Dans l'état actuel du développement industriel du procédé, il est possible d'envisager le FSW dans plusieurs configurations de soudures en bout à bout et par transparence, ainsi que l'illustre la figure 98.



Figure 96

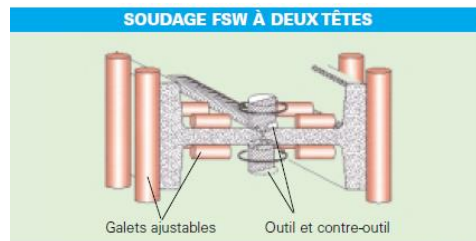


Figure 97

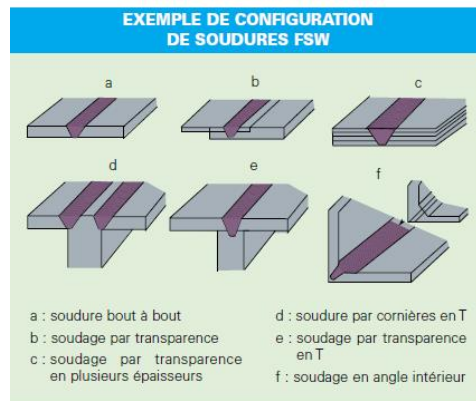


Figure 98

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES SUR 5083 ET 5383 SOUDÉS DE 6 MM D'ÉPAISSEUR [20]				
Alliage	Soudage	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A %
5083 H116	MIG	134	287	12,8
	FSW	157	335	17
Sealium®	MIG	150	308	13,5
	FSW	165	354	17

Tableau 55

LIMITE D'ENDURANCE SUR 5383 (À 10^7 CYCLES ET POUR $R = 0,1$) [11]		
Alliage	Mode de soudage	Limite d'endurance (MPa)
Sealium®	Métal de base	228
	FSW	172
	MIG	144

Tableau 56

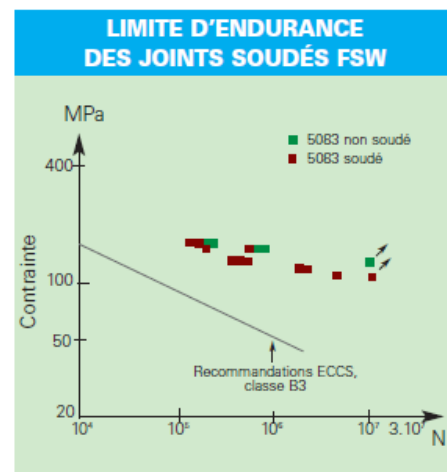


Figure 99

5. Performances des soudures par friction malaxage

La caractérisation des propriétés (caractéristiques mécaniques, tenue en fatigue, tenue à la corrosion du joint soudé) a fait l'objet de nombreuses études [19].

n Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques sur métal soudé FSW sont supérieures à celles du métal soudé MIG (tableau 55).

Les ruptures ont généralement lieu en bordure de la zone de friction, jamais dans celle-ci en raison, sans doute, de l'écroutissage provoqué par le patin de l'outil.

La limite d'élasticité est plus élevée sur métal soudé FSW, d'au moins 10 % par rapport au soudage MIG.

n Tenue en fatigue

La limite d'endurance est supérieure sur métal soudé FSW par rapport au soudage MIG [21] (figure 99 et tableau 56.)

La limite d'endurance sur joint soudé FSW est toujours supérieure à celle du joint soudé MIG, et c'est vrai pour tous les alliages.

Cette performance s'explique par le fait que le FSW permet d'assurer une très bonne liaison entre les pièces à assembler. Il n'y a pas de collage. Il va de soi que ce n'est vrai que si le joint soudé FSW est exempt de défauts.

n Tenue à la corrosion

Les investigations menées jusqu'à maintenant n'ont pas montré de sensibilité particulière à la corrosion des soudures FSW. Leur tenue à la corrosion est au moins égale à celles des soudures réalisées en MIG ou en TIG.



6. LES NORMES

Les principales normes concernant le soudage de l'aluminium sont indiquées dans le tableau 57.

PRINCIPALES NORMES EUROPÉENNES SUR LE SOUDAGE DE L'ALUMINIUM		
Référence	Date	Objet
NF EN 1011-4	déc. 2000	Soudage – Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques – Partie 4 : Soudage à l'arc de l'aluminium et des alliages d'aluminium
NF A 89-310	avril 1973	Aluminium et alliages d'aluminium – Soudage – Assemblages élémentaires types – Critères de choix
NF A 87-010	avril 1973	Aluminium et alliages d'aluminium – Soudage – Préparation des bords
NF EN 288-4/A1	août 1997	Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques – Partie 4 : Épreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage à l'arc sur l'aluminium et ses alliages
NF A 89-220	avril 1973	Aluminium et alliages d'aluminium – Soudage – Classification et contrôle des joints soudés
BS 8118		Structural use of aluminium. Part 2. Specifications for materials, workmanship and protection
NF EN ISO 9692-3	déc. 2001	Soudage et techniques connexes – Recommandations pour la préparation de joints – Partie 3 : Soudage MIG et TIG de l'aluminium et de ses alliages (ISO 9692-3 : 2000)
NF EN 12584	juin 1999	Défauts des coupes exécutées par oxycoupage, coupage laser et coupage plasma – Terminologie
NF EN 30042 ISO 10042	juill. 94	Assemblages en aluminium et alliages d'aluminium soudables soudés à l'arc-Guide des niveaux d'acceptation des défauts
NF EN ISO 13919-2	déc. 2001	Soudage – Assemblages soudés par faisceau d'électrons et par faisceau laser-Guide des niveaux de qualité des défauts – Partie 2 : Aluminium et ses alliages soudables (ISO 13919-2 : 2001)
NF EN ISO 6520-1	déc. 1998	Soudage et techniques connexes – Classification des défauts géométriques dans les soudures des matériaux métalliques – Partie 1 : Soudage par fusion (ISO 6520-1 : 1998)
NF EN 83-100-1	déc. 1995	Construction d'ensembles mécano – soudés. Techniques de soudage. Partie 1 – Généralités : Terminologie, Classes de qualité de soudure – Etendue des contrôles
NF EN 12062	oct. 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Règles générales pour les matériaux métalliques
NF EN 970	mai 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés par fusion – Contrôle visuel
NF A 09-120	juin 1984	Essais non destructifs. Principes généraux de l'examen par ressuage

Référence	Date	Objet
NF EN 1289	août 1998	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ressuage des soudures – Niveaux d'acceptation
NF EN 1712	nov. 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation
NF EN 1713	sept. 1998	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons – Caractérisation des indications dans les assemblages soudés
NF EN 1714	oct. 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés
NF EN 1712/A1	févr. 03	Essais non destructifs des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation
NF EN 1714/A1	févr. 2003	Essais non destructifs des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés
NF EN 444	avril 1994	Essais non destructifs. Principes généraux de l'examen radiographique à l'aide de Rayons X et gamma des matériaux métalliques
NF EN 1435	oct. 1997	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par radiographie des assemblages soudés
NF EN 12517	sept. 1998	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par radiographie des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation
NF EN 287-2	juin 1992	Épreuve de qualification des soudeurs – Soudage par fusion – Partie 2 : Aluminium et ses alliages
NF EN 287-2/A1	août 1997	Épreuve de qualification des soudeurs – Soudage par fusion – Partie 2 : Aluminium et ses alliages
NF EN ISO 9956-10	nov. 1996	Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques – Partie 10 : Descriptif d'un mode opératoire de soudage par faisceau d'électrons
NF EN ISO 9956-11	nov. 1996	Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques – Partie 11 : Descriptif d'un mode opératoire de soudage par faisceau laser
NF EN 12345	juin 1999	Soudage – Liste multilingue de termes relatifs aux assemblages et aux joints soudés, avec illustrations
NF EN 1792	février 1998	Soudage – Liste multilingue de termes concernant le soudage et les techniques connexes

Tableau 57

Références bibliographiques

- [1] « Soudure et chaudronnerie d'aluminium », *Revue de l'Aluminium*, n° 99, mars 1938, pp. 1128-1135.
- [2] « Le soudage à l'arc des métaux légers avec électrode fusible enrobée », CHARLES GUINARD, *Revue de l'Aluminium*, n° 167, juin 1950, pp. 237-244.
- [3] « Die Fügetechniken des Aluminiums im Laufe der Jahrzehnte » G. AICHELE, *Aluminium*, vol. 75, 1999, pp. 743-753.
- [4] « Construction of the All-Welded Twin-Screw Auxilliary Motor Yacht », J. G. YOUNG, *British Welding Journal*, Jan. 1955, pp. 1-18.
- [5] « Nocivité des XXX de soudage sur éprouvettes soudées MIG ». D. ALBERT, C. HANTRAIS, M. MÉDIOUNI, M. TRICOT, *Rapport Pechiney CRV 3535*, déc. 1994.
- [6] « Repairs yards show their versatility » *Speed at Sea*, April 1998.
- [7] « Routine repairs provide annual returns », *Speed at Sea*, Jan. 1999.
- [8] « Aluminium skills are part of routine workload », *Speed at Sea*, Oct. 2000.
- [9] « Developments in welding techniques for aluminium alloys », J. D. RUSSEL, C. J. DAWES, R. L. JONES, TWI, *Conférence Southampton*, 1996.
- [10] « Improvements relating to friction welding », W. M. THOMAS, E. D. NICHOLAS, J. C. NEEDHAM, M. G. MURCH, P. TEMPLE SMITH, C. J. DAWES (TWI), Brevet GB 91 25978.8, international PCT/GB92/02203 et European Patent Specification 0 615 480 B1.
- [11] « Application of Friction Stir Welding for manufacture of aluminium ferries », S. W. KALLE, E. D. NICHOLAS, P. M. BURLING, TWI, *4th International Forum on Aluminium Ships*, New Orleans, May 2000.
- [12] *4th International Forum on Aluminium Ships*, New Orleans, May 2000. *European Shipbuilding in the 21st Century*, London, December 2000. *The Third International Forum on Aluminium Ships*, Haugesund, Norway, May 1998. *Lightweight Construction – Latest Developments*, The Royal Institution of Naval Architects, London Feb 2000.
- [13] « Studies extend Friction Stir Welding potential », *Speed at Sea*, Oct. 1998, p. 45.
- [14] « Friction Stir benefits include cost saving ». P. HYND, *Speed at Sea*, Oct. 1999, p. 33.
- [15] « Friction Stir Welding in aluminium alloys, preliminary microstructural assessment. », P. L. THREADGILL, *TWI Bulletin*, vol. 28 (2), 33, March 1997, p. 30.
- [16] *Friction Stir Welding – Weld properties and manufacturing techniques*, Proc INALCO-7, Cambridge April 1998, pp. 171-181.
- [17] « Application of prefabricated Friction Stir Welding panels in catamaran building », O. T. MIDLING, J. S. KVÅLE, S. OMA, *4th International Forum on Aluminium Ships*, New Orleans, May 2000.
- [18] « Exploiting friction stir welding in explosively-formed aluminium boat hull construction », I. HENDERSON, *Joints in aluminium*, INALCO 98, 1998, pp. 261- 267.
- [19] « Friction Stir Welding – The state of the art », P. L. THREADGILL, *Report TWI 7417.01/99/1012*.
- [20] *Rapport Pechiney*, CRV, février 1999.
- [21] « Friction Stir Welding aluminium alloy 5083, Increased welding speed », C. J. DAWES, E. J. R. SPURGIN, D. G. STAINES, *Report TWI 7735.1/98/993.2*.