

Etude métallurgique du soudage par friction malaxage sur un acier à haute limite élastique destiné à la construction navale : le 80 HLES

Metallurgical study of friction stir welding on a steel high yield for shipbuilding: The 80 HLES

Marion Allart^{1,3}, Guillaume Rückert² et Pascal Paillard³

¹ Institut de Recherche Technologique (IRT) Jules Verne, Nantes, France

² DCNS Research, CESMAN, Indret, France

³ Institut des Matériaux Jean Rouxel, IMN – ID2M, UMR CNRS 6502, Nantes France

Abstract. The friction stir welding is a welding process relatively recent (early 90s). It is now commonly used on light alloys but is only recently on steels.

The objective of our work is to try to characterize the metallurgical microstructure and state of stress and strain after friction stir welding on samples of high strength steels used in the shipbuilding industry. We seek to understand the metallurgical phenomena that occur during welding.

Résumé. Le soudage par friction malaxage est un procédé de soudage relativement récent (début des années 90). Il est aujourd'hui utilisé couramment sur des alliages légers mais ne l'est que depuis peu sur les aciers.

L'objectif de nos travaux est de chercher à caractériser la microstructure métallurgique et l'état de déformation et de contrainte après soudage par friction malaxage sur des échantillons d'aciers à haute limite élastique utilisés dans l'industrie navale. Nous chercherons à comprendre les phénomènes métallurgiques qui interviennent en cours de soudage.

INTRODUCTION

Le soudage par friction malaxage est plus connu sous son selon son acronyme anglosaxon *FSW* pour *Friction Stir Welding*. Il s'agit d'un des plus récents procédé de soudage, puisque le premier brevet le concernant a été déposé par l'institut anglais *The Welding Institute* en 1991.

Jusque récemment, l'usage industriel de ce procédé a été limité aux alliages légers, typiquement les alliages d'aluminium, car il n'existait pas d'outils assez résistants pour les autres familles d'alliages dont les aciers. De récents développements technologiques, notamment l'usage de nitrure de bore cubique polycristallin (ou PCBN), a permis d'élargir le champ d'utilisation du FSW.

Notre étude a deux objectifs principaux. Le premier est la détermination des transformations métallurgiques provoquées par le cycle thermo-mécanique subi par le matériau en cours de soudage. Nous étudierons pour cela des échantillons d'aciers à haute limite élastique soudés par ce procédé. Le second objectif est de contribuer à statuer sur l'industrialisation de ce procédé dans les chantiers navals français, civils ou militaires.

LE PROCÉDÉ FSW

Par définition, une action de soudage doit comprendre la fusion des métaux à assembler. Le cas du soudage par friction est une exception, puisque la matière atteint un état pâteux mais ne fond pas. Dans le cas du FSW, la montée en température est obtenue par le frottement de l'épaulement d'un outil en rotation à la surface de l'outil ainsi qu'il est représenté sur la Figure 1. Généralement les

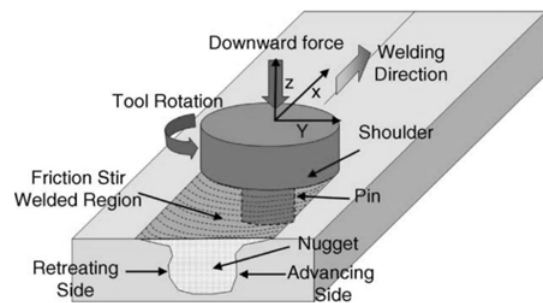


Figure 1. Schématisation du procédé de soudage par friction malaxage ou FSW [1].

outils utilisés sont composés d'un épaulement qui permet l'échauffement de la matière depuis sa surface et d'un pion qui permet quant à lui le malaxage de la matière échauffée. Une force importante, variable selon le matériau et l'épaisseur à souder, est nécessaire pour permettre une force de frottement suffisante et donc un échauffement suffisamment puissant. Une fois le métal dans un état amolli, le pion, partie basse de l'outil, va se charger de malaxer la matière. Le joint soudé se forme alors au fur et à mesure de l'avancée de l'outil.

Il s'agit là d'un procédé asymétrique, on distinguera donc le côté « advancing » où la matière est retirée par l'outil du côté « retreating » où à l'inverse l'outil tend à accumuler du métal.

Ce procédé est à l'heure actuelle utilisé de façon industrielle mais il est limité aux alliages légers tels que les alliages d'aluminium. La limitation technologique réside dans le matériau à utiliser pour l'outil : jusque

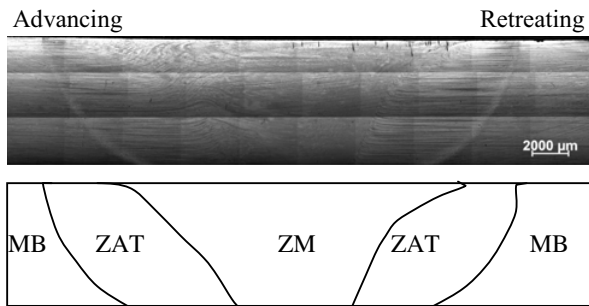


Figure 2. Macroscopie d'un échantillon d'acier 80 HLES soudé par FSW et schématisation des zones caractéristiques.

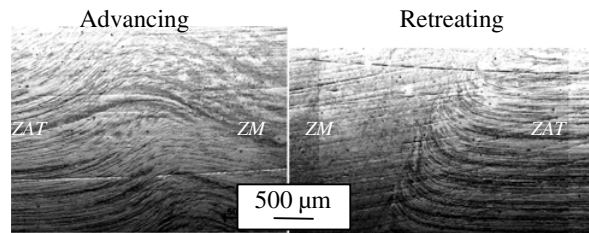


Figure 3. Micrographies de la zone limite entre zone affectée thermiquement et zone malaxée côté advancing (gauche) et côté retreating (droite).

récemment, il n'existait pas d'outil permettant de résister à la température et aux pressions nécessaires pour souder ainsi des matériaux plus durs. Des outils en nitrure de bore cubique polycristallin (PCBN) ouvrent désormais le champ d'action du FSW aux aciers.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Dans cette étude nous nous attacherons à caractériser d'un point de vue métallurgique une soudure par FSW d'un acier de construction navale, le 80 HLES, qui est l'équivalent français de la nuance américaine HY100. L'épaisseur de la tôle soudée est de 8 mm.

Une macrographie de la soudure est obtenue par attaque électrolytique puis observation au microscope optique. Nous avons également acquis sur notre échantillon une cartographie de microduretés en effectuant des points de dureté Vickers tous les 0,5 mm sous une charge de 1 kg. Un repérage des côtés « advancing » et « retreating », comme nous les avons définis au paragraphe précédent, permet de les différencier sur les différents résultats obtenus.

RÉSULTATS

Macrographie

Une préparation de l'échantillon par polissage mécanique puis attaque électrolytique permet de révéler la microstructure de la zone soudée, ainsi que nous l'avons représenté sur la Figure 2.

Nous distinguons sur cette image les zones caractéristiques d'un assemblage soudé par FSW que sont

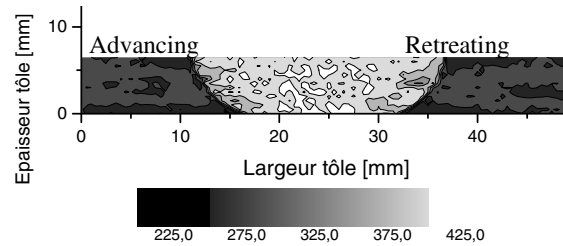


Figure 4. Cartographie de dureté Vickers HV1 d'un échantillon d'acier 80 HLES soudé par FSW.

Tableau 1. Tailles des différentes zones caractéristiques de la soudure.

[mm]	ZAT advancing	ZM	ZAT retreating
haut	3,48	19,22	3,42
milieu	7,48	10,46	6,54
bas	5,16	5,55	5,13

Tableau 2. Mesures de microdureté Vickers sur le métal de base après différents traitements thermiques.

Traitement thermique	Dureté Vickers moyenne (1 kg)
Aucun (métal de base)	291
900° C 1h + refroidi air	281
900° C 1h + trempe huile	397
900° C 1h + trempe air	421

le métal de base (MB), la zone affectée thermiquement (ZAT) ainsi que la zone malaxée (ZM). Leurs dimensions, mesurées sur la Figure 2, sont réunies dans le Tableau 1.

L'attaque électrolytique révèle des bandes sombres qui sont des précipités présents dans le métal. Leur présence nous permet de visualiser la déformation subie par la matière en cours de soudage. On peut notamment comparer le comportement de la matière à la limite entre la zone malaxée et la zone affectée thermiquement de chacun des côtés de la soudure, ainsi qu'il est visible sur la Figure 3.

Cartographie de microdureté

La cartographie de microdureté obtenue est visible sur la Figure 4.

On peut observer une augmentation de la dureté dans la ZAT et plus encore dans la ZM.

Nous pouvons comparer ces valeurs de duretés avec celles obtenues sur le métal de base après différents traitements thermiques, à savoir un recuit d'une heure à 900° C, au-dessus de la température d'austénitisation, puis selon les échantillons un refroidissement à l'air, une trempe à l'huile ou à l'eau. Les résultats sont réunis dans le Tableau 2.

Il semble donc que, malgré l'absence de fusion, la température atteinte par le métal en cours de soudage soit supérieure à la température d'austénitisation et que les vitesses de refroidissements atteintes sont proches de celles d'une trempe dans la zone malaxée.

PERSPECTIVES

Cette étude est destinée à être complétée entre autres par l'analyse de joints soudés sur d'autres aciers, qu'ils soient à haute limite élastique ou non.

De plus, ce procédé nécessitant intrinsèquement une forte déformation du matériau, il est plus que probable que de fortes déformations et contraintes résiduelles subsistent dans l'assemblage. Celles-ci pouvant être rédhibitoires pour l'utilisation industrielle du FSW, il conviendra de les

étudier et de les quantifier. Une campagne de mesure de contraintes résiduelles par diffraction neutronique est donc programmée au cours de ce projet.

Références

- [1] Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., *Friction stir welding and processing*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005. **50**(1–2): p. 1–78.