



**EUROPE
TECHNOLOGIES**

SONATS



**AMÉLIORATION DE LA TENUE EN FATIGUE DES
STRUCTURES SOUDÉES PAR MARTELAGE
ACTIVÉ PAR ULTRASONS**



**SOLUTIONS INNOVANTES DE
TRAITEMENT DE SURFACE PAR IMPACT**

GRENAILLAGE DE PRÉCONTRAÎNTE PAR ULTRASONS
PARACHÈVEMENT DE SOUDURE PAR ULTRASONS
REDRESSAGE/FORMAGE PAR ULTRASONS

Révision	Modifications	Date	Auteur
0	Issue	8 Décembre 2014	P.LEFEVRE
1	Nouveau résultat : cas FRAUNHOFER	16 Juin 2016	P.LEFEVRE
2	Nouveau résultat : cas PURDUE UNIVERISTY	3 Octobre 2018	P.LEFEVRE
3	Recommandations AASHTO	14 Novembre 2019	P.LEFEVRE

TABLE DES MATIÈRES

1. RÉSUMÉ.....	6
2. EFFET DU MARTELAGE PAR ULTRASONS	7
2.1. Modification de la géométrie du pied de cordon de soudure	7
2.2. Contraintes résiduelles de compression	8
3. PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	9
3.1. Fréquence de vibration mécanique et fréquence d'impact des aiguilles.....	9
3.2. Amplitude de vibration.....	10
3.3. Consommation électrique du martelage par ultrasons	11
3.4. Géométrie et diamètres des percuteurs/aiguilles.....	11
4. RECOMMANDATIONS RELATIVES À LA FATIGUE.....	12
4.1. Recommandations de l' IIW.....	12
4.2. Approches des sociétés de classification	13
4.2.1. American Bureau of Shipping – ABS.....	13
4.2.2. Lloyd's Register –LR	13
4.2.3. Bureau VERITAS	15
4.3. Recommandation de l'AASHTO (Americcan Association of State Highway and transportation officials) et de la FHWA (Federal highway Administration).....	16
5. RÉSULTATS AVEC L'ÉQUIPEMENT SONATS UNP.....	16
5.1. Études publiées.....	16
5.1.1. Amélioration de la tenue en fatigue de strucutres soudées grâce au procédé STRESSONIC® UNP 16	16
5.1.2. Comportement des fixations longitudinales martelées à haute fréquence soumise à la fatigue29	18
5.1.3. Amélioration de la tenue en fatigue des structures soudées par martelage activé par ultrasons comparée à l'enrobage TIG 30.....	18
5.1.4. US Navy : étude systématique des paramètres UIT sur les contraintes résiduelles sur l'alliage AA5456 sensibilisé et mesures des contraintes résiduelles sur le terrain pour anticiper et limiter les fissures de corrosion sous contrainte 31	19
5.1.5. Amélioration de la tenue en fatigue des assemblages soudés en acier et aluminium par Martelage Ultrasons.....	19
5.1.6. Amélioration de la durée de vie en fatigue de poutres soudées de ponts par traitement HFMI32	21
5.2. Études en cours	22
5.2.1. Société Nationale des Chemins de Fer - SNCF - France.....	22
5.2.2. Décryptage des mécanismes liés à l'effet du martelage sur des structures soudées soumises à la fatigue	22
5.2.3. COMPORTEMENT DES ENSEMBLES SOUDÉS À L'ARC SOUMIS À LA FATIGUE : VOIES D'AMÉLIORATION 34	23
6. EXPÉRIENCE SONATS.....	23
6.1. Strucutre de génie civil	23
6.2. Engins lourds	23
6.3. Constructions navales.....	24
6.4. Énergie	24
6.5. Défense	25
6.6. Solutions de martelage automatisées.....	25
7. RÉFÉRENCES	26

1. RÉSUMÉ

La technique traditionnelle de martelage est un traitement post-soudage bien connu pour améliorer la tenue en fatigue. Cette méthode est appliquée sur le pied de cordon de soudure uniquement.

Le martelage par ultrasons (UNP) (également appelé traitement par impacts d'ultrasons -UIT- ou impact mécanique haute fréquence -HFMI) est un procédé qui permet d'obtenir le même résultat qu'avec la technique de martelage traditionnelle, mais avec beaucoup plus de contrôle. L'UNP est également plus rapide et beaucoup moins dangereux pour l'opérateur.

En Figure 1 se trouve un exemple d'équipement de martelage utilisé par les opérateurs de SONATS.

De plus, ce procédé peut être utilisé par un opérateur après seulement une journée de formation. C'est pour toutes ces raisons que de nombreuses industries se sont intéressées à cette technologie innovante.

Ce document décrit les recherches effectuées par SONATS, les expériences sur le terrain ainsi que les connaissances concernant la technique de martelage par ultrasons. Il s'adresse à toutes les personnes (ingénieurs, soudeurs, opérateurs, contrôleurs) intéressées par ce procédé.



Figure 1 : Système SONATS NOMAD UNP

NOTE : De nombreux termes sont utilisés pour décrire le procédé qui consiste à utiliser des vibrations mécaniques haute fréquence afin de mettre en mouvement des percuteurs ou des aiguilles venant frapper la surface métallique à traiter :

- *UIT (Ultrasonic Impact Treatment) ou traitement par impacts d'ultrasons,*
- *UNP (Ultrasonic Needle Peening) ou martelage par ultrasons,*
- *UP (Ultrasonic Peening) ou martelage par ultrasons,*
- *ou traitement HFMI (High Frequency Mechanical Impact) ou impact mécanique haute fréquence.*

Dans ce document, nous utiliserons principalement les termes « martelage par ultrasons » ou « UNP ».

2. EFFET DU MARTELAGE PAR ULTRASON

D'après P. J. Haagensen et S. J. Maddox , « Le pied de cordon de soudure est l'une des principales sources de fissures en raison de l'importante concentration de contraintes générée par cette zone »⁴. Le pied de cordon de soudure peut donc être considéré comme « zone d'entaille ».

Le martelage par perceurs ou par aiguilles est un procédé très ancien qui consiste à venir percuter manuellement une soudure avec un perceur afin d'améliorer sa finition de surface et sa résistance. Plus tard, des outils pneumatiques et magnétostrictifs ont été développés afin d'aider l'opérateur. De nos jours, le principe est toujours le même mais la conception de l'équipement a été améliorée. Les toutes dernières technologies utilisent l'effet piézoélectrique pour transformer des vibrations électriques en vibrations mécaniques. L'élément vibrant, appelé Sonotrode, est ensuite utilisé pour fournir de l'énergie cinétique à une aiguille (ou à un perceur). Grâce à ces outils modernes, l'influence de l'opérateur sur l'application du procédé est proche de zéro, avec peu d'efforts et une grande rapidité de traitement.

La recherche sur le martelage par ultrasons a débuté à la fin des années 50 et années 60 en URSS^{3, 5, 4}. Des recherches approfondies ont été menées plus tard dans les années 90 sur les aciers structurels⁶, l'acier haute résistance et l'aluminium^{7, 8}, mettant à chaque fois en évidence une importante amélioration en termes de tenue en fatigue. En 1996, l'Institut international de soudure (IIW) a publié une spécification⁹ et en 1999 le premier « Guide d'application du traitement par impacts d'ultrasons »¹⁰.

À partir de là, de nombreuses industries ont commencé à s'intéresser à ces techniques efficaces et faciles d'utilisation pour l'amélioration post-soudage.

Les méthodes d'amélioration du pied de cordon de soudure reposent sur deux principes majeurs :

- la modification de la géométrie du pied de cordon de soudure

- la modification des contraintes résiduelles

Le martelage par ultrasons agit sur ces deux phénomènes pour finalement obtenir une amélioration importante de la tenue en fatigue de la zone soudée traitée.

2.1. Modification de la géométrie du pied de cordon de soudure

Les méthodes traditionnelles de traitement post-soudage, telles que l'enrobage TIG ou le meulage du pied de cordon de soudure, consistent à augmenter le rayon au niveau de la transition entre le matériau de base et le joint de soudure.

Avec le martelage par ultrasons, on obtient le même résultat par le biais d'impacts haute fréquence, capables d'induire localement une déformation et de créer une rainure contrôlée au niveau du pied de cordon. La figure 2, ci-dessous, illustre la modification de géométrie après UNP/UIT comparée à une soudure non traitée ou à d'autres méthodes de post-traitement.

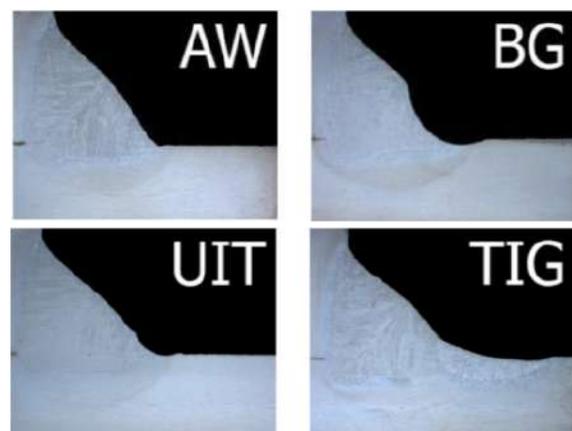


Figure 2: Image illustrant des soudures de géométries en condition de brut de soudage après traitement (traitement par impact ultrason, UIT et enrobage TIG)¹¹

Le traitement doit être appliqué uniformément tout le long du pied de cordon de soudure, sans

discontinuité. La rainure ainsi créée par impacts successifs peut être représentée comme suit. La figure 3 représente le schéma d'une rainure.

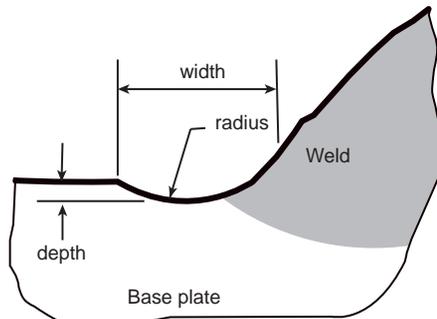


Figure 3: Schéma d'une rainure créée par UNP

Les résultats observés dans la littérature indiquent un large éventail de dimensions de rainures. Galtier et al ont mesuré, après UIT sur 2 nuances d'acier, des rayons allant de 0,8 mm à 2,0 mm et une profondeur située entre 0,17 mm et 0,4 mm.

Yildirim & Marquis¹³ ont étudié l'effet de plusieurs outils HFMI et les rayons mesurés allaient de 1,80 mm à 4,55 mm, la largeur de 2,39 mm à 5,45 mm et la profondeur de 0,16 mm à 0,29 mm.

Une autre étude menée par Yekta et al¹⁴ indique les dimensions de rainures suivantes (figure 4) pour un seul équipement avec plusieurs durées de traitement par martelage différentes.

Mesure géométrique du cordon de soudure					
Group (mm)	Rayon		Profondeur de soudure (profondeur extérieure du métal de base)		
	x (mm)	s (mm)	x (mm)	s (mm)	max. (mm)
B	1.76	0.36	0.16	0.04	0.19
C	2.09	0.18	0.16	0.06	0.22
D	1.17	1.09	0.17	0.15	0.39
E	1.69	0.27	0.36	0.07	1.10
F	2.37	0.11	0.27	0.07	0.37

Note : x=moyenne; s= écart type

Figure 4 : Rayon (entre 1,17 et 2,37 mm) et Profondeur (entre 0,16 et 0,36 mm) selon différentes conditions de martelage ¹⁴

Toutes les géométries présentées dans ces 3 études conduisent à une importante amélioration en termes de tenue en fatigue, grâce à l'utilisation de différents systèmes de martelage par ultrasons

et procédés de traitement et sur plusieurs matériaux. En 2013, Marquis et Barsoum¹⁵ ont compilé 46 études de la dernière décennie afin d'établir des procédures et des directives d'assurance qualité concernant le procédé de martelage par ultrasons. Dans ce document, nous pouvons lire « La profondeur d'indentation après traitement HFMI doit être de 0,2 à 0,6 mm, tandis que la largeur résultante est généralement de 2 à 5 mm ».

NOTE : Ces valeurs sont données en tant que géométries types ; elles englobent la totalité des pieds de cordon de soudure par impacts (on parle de couverture à 100 %).

2.2. Contraintes résiduelles de compression

Le second effet du martelage par ultrasons est l'introduction de contraintes résiduelles de compression bénéfiques. Selon l'outil, l'intensité du traitement et le matériau, le niveau de compression introduit peut varier.

Le figure 5, ci-dessous, illustre des profils de contraintes résiduelles obtenus après traitement UNP sur de l'acier S355 ; plusieurs configurations ont été caractérisées. Ces mesures ont été effectuées par diffraction de rayons X dans les laboratoires de SONATS (Carquefou, France).

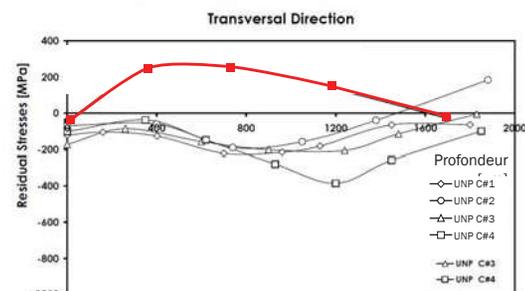


Figure 5: Distribution des contraintes résiduelles (sens transversal) à la surface et en profondeur, au niveau du pied de cordon de soudure ¹⁶

La courbe rouge correspond à l'échantillon non traité ; d'importantes contraintes résiduelles de tension sont observées jusqu'à 1,6 mm de profondeur.

Après UNP, on observe d'importantes contraintes résiduelles de compression jusqu'à plus de 1,4 mm de profondeur pour toutes les conditions. Quant au grenailage de précontrainte (ou

3. PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ

grenailage de précontrainte par ultrasons), la compression induite est bénéfique pour la tenue en fatigue, agissant contre les sollicitations de service.

Yildirim & Marquis¹³ observent des résultats similaires : « des contraintes résiduelles de tension ont été observées au niveau de tous les pieds de cordons mesurés. Les valeurs allaient de +185 à +552 MPa. Pour les échantillons traités par HFMI, des contraintes résiduelles de compression ont été mesurées dans 31 rainures HFMI sur les 32 étudiées avant les tests de fatigue. La seule rainure HFMI indiquant une contrainte résiduelle de tension présentait une valeur de seulement 52 MPa. Les contraintes résiduelles de compression avant les tests de fatigue se situaient entre -53 et -457 MPa pour les échantillons d'acier haute résistance. »

Suite à cette étude, les auteurs ont conclu que le martelage par ultrasons induit des contraintes de compression sur les pieds de cordons de soudures traités pour tous les équipements testés.

Le procédé UNP/UIT/HFMI est régi par plusieurs paramètres, dont l'influence est expliquée dans ce paragraphe.

3.1. Fréquence de vibration mécanique et fréquence d'impact des aiguilles

Sur un système de martelage par ultrasons, un signal électrique haute tension est créé par un générateur d'ultrasons. Ce signal est ensuite converti en vibration mécanique à la même fréquence, soit par un convertisseur piézoélectrique, soit par un convertisseur magnétostrictif.

Lorsque l'aiguille (ou le percuteur) entre en contact avec la surface en vibration, elle gagne de l'énergie cinétique et est projetée contre la zone à traiter. Ensuite, l'aiguille revient vers la surface vibrante pour le cycle suivant.

Par conséquent, la fréquence de vibration mécanique et la fréquence d'impact des aiguilles doivent être dissociées.

Le schéma suivant (Figure 6) illustre les éléments acoustiques et le percuteur à l'intérieur de la tête de grenailage du NOMAD SONATS:

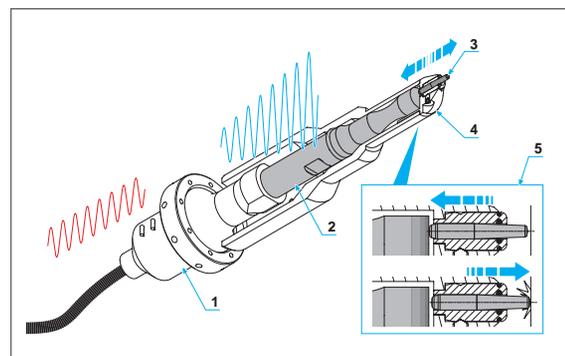


Figure 6 : Éléments acoustiques à l'intérieur de la tête de martelage UNP (SONATS)

Avec:

1. Convertisseur piézoélectrique
2. Sonotrode
3. Percuteur (ou aiguille) spécifique
4. Embout (pour guider le percuteur)
5. Ce petit schéma illustre le cycle de mouvement du percuteur à l'intérieur de l'embout.

Influences sur les résultats :

La fréquence de vibration des ultrasons de la sonotrode est la même que celle du convertisseur, mais le percuteur est découplé de la sonotrode (par conséquent, la fréquence d'impact est inférieure à la fréquence des ultrasons). En appuyant l'outil sur le pied de cordon de soudure, l'opérateur force l'aiguille à entrer en contact avec la sonotrode vibrante, pour finalement percuter le pied de cordon de soudure avec une fréquence inférieure à la fréquence de vibration de la sonotrode

Concernant l'équipement SONATS, la fréquence de vibration des ultrasons est de 20 KHz avec une fréquence d'impact entre 100 et 400 Hz (d'après les mesures réalisées par comptage des impacts sur des plaques d'acier). La fréquence d'impact dépend de la pression appliquée par l'opérateur, l'amplitude de vibration, la forme de l'aiguille, le matériau et la vitesse de course le long du pied de cordon.

Figure 7¹⁷ : premier équipement développé par l'E.O. Paton Welding Institute (Ukraine) fonctionnant à 27 KHz.

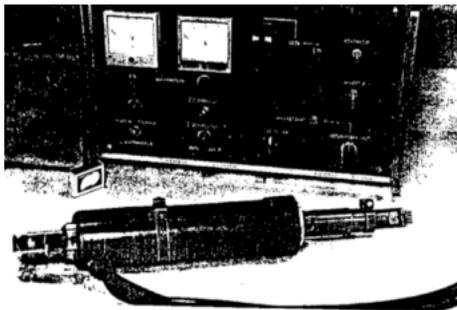


Figure 7 : Premier outil UIT développé par l'E.O. Paton Welding Institute (Ukraine)

Plus tard, cet outil a été utilisé pour de nombreux programmes de test de fatigue sur des échantillons de laboratoire et des structures réelles, avec à chaque fois une amélioration intéressante de la tenue en fatigue^{6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 26}. E S Statnikov¹⁸ explique que l'équipement à 27 KHz génère des impacts d'une fréquence allant de 80 à 200 Hz. Cette fréquence d'impact est similaire aux valeurs observées pour l'équipement SONATS.

D'après Y. Kudryavtsev, un équipement piézoélectrique à 20 KHz a été développé au début des années 90. Les résultats des tests de fatigue indiquent des améliorations de la tenue en fatigue similaires à celles d'un équipement

magnétostrictif à 27 KHz^{19, 20, 21}.

En 2013, l'Institut international de la soudure (IIW) a réalisé un test comparatif interlaboratoire comparant l'amélioration de la tenue en fatigue qu'il était possible d'obtenir avec différents traitements HFMI (impact mécanique haute fréquence), dont l'équipement à 27 KHz, l'équipement à 20 KHz et des outils pneumatiques basse fréquence (< 1KHz)¹³. Les échantillons soudés longitudinaux ne portant pas de charge ont été traités par HFMI. Les échantillons ont subi un test de fatigue sous sollicitation axiale. Les résultats du test de fatigue indiquent que toutes les soudures traitées par HFMI via un équipement avec 3 fréquences de vibration (27 KHz, 20 KHz et <1000 Hz) ont satisfait les exigences de l'IIW (FAT160 et m1=5).

Ce test comparatif interlaboratoire ainsi que des études précédentes indiquent clairement que la fréquence de vibration n'a aucune influence sur l'amélioration de la tenue en fatigue générée par le procédé UNP/UIT. Le paramètre important est la fréquence d'impact et sa reproductibilité.

Une continuité régulière et totale de la rainure doit être produite par l'opérateur sur les pieds de cordons de soudures. Grâce à sa fréquence d'impact de martelage et à son amplitude constantes, l'équipement SONATS permet d'avoir un procédé bien plus rapide tout en assurant la sécurité de l'opérateur. Les outils pneumatiques basse fréquence souffrent d'un manque de contrôle sur la fréquence d'impact et l'amplitude, et induisent des conditions de martelage dangereuses empêchant ainsi l'opérateur d'obtenir facilement une rainure nette et continue.

3.2. Amplitude de vibration

Une vibration est définie par sa fréquence et son amplitude. En règle générale, lorsque la fréquence de vibration augmente, l'amplitude diminue. L'équipement SONATS NOMAD UNP peut fonctionner sur une plage de 10 µm à 60µm crête à crête.

L'onde ultrasonore sinusoïdale, figure 8 ci-dessous, illustre l'onde ultrasonore sinusoïdale.

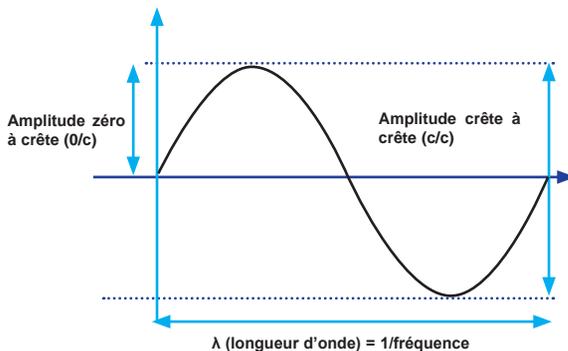


Figure 8 : Onde Sinusoïdale

La grande quantité d'énergie nécessaire pour traiter le pied de cordon de soudure est obtenue grâce au petit déplacement à très haute vitesse, induisant une grande accélération du percuteur. La petite amplitude est plus pratique comparée à l'amplitude élevée obtenue à basse fréquence par un équipement pneumatique (plusieurs millimètres de déplacement).

L'amplitude de vibration doit être facilement modifiable en fonction du matériau à traiter. Afin de répondre aux exigences de l'IIW (dimension de rainure), SONATS utilise généralement l'amplitude de vibration suivante (tableau 1) :

Fréquence	20 000 Hz		
Matériel	Acier	Aluminium	Acier inoxydable
Amplitude (p/p)	30 - 60 μm	20-40 μm	20-40 μm

Tableau 1 : Amplitude de vibration type de la sonotrode pour l'équipement SONATS NOMAD UNP

SONATS a effectué un test de fatigue avec une amplitude c-c de 60 μm obtenant une importante amélioration de la tenue en fatigue¹⁶. André Glatier et al¹² ont utilisé une amplitude de vibration de la sonotrode égale à 40 μm c-c pour traiter de l'acier haute résistance ; la tenue en fatigue de l'échantillon de soudure en T est plus de deux fois supérieure à l'échantillon non traité.

L'amplitude de vibration n'est pas considérée comme un paramètre clé dans la grande majorité des publications. L'influence de ce paramètre sur l'amélioration de la tenue en fatigue n'a donc pas été étudiée. Même si l'influence de l'amplitude est

faible par rapport à l'amélioration de la tenue en fatigue, elle a une réelle influence sur la rapidité du traitement et sur la manœuvrabilité de l'équipement, et donc sur la continuité et la qualité de la rainure. Il est donc très important d'avoir un contrôle parfait de l'amplitude de vibration de la sonotrode.

3.3. Consommation électrique du martelage par ultrasons

Certaines études parlent de la consommation électrique de l'équipement à ultrasons. Elle dépend de plusieurs paramètres qui sont :

- le type de convertisseur (piézoélectrique ou magnétostrictif)
- la qualité de conception et de fabrication de l'équipement
- la pression appliquée par l'opérateur sur l'outil
- le matériau à traiter
- l'amplitude de vibration

En fonction de ces paramètres, la consommation électrique effective de l'équipement peut être multipliée par 10 pour obtenir une amélioration de la tenue en fatigue identique.

La consommation électrique de l'équipement SONATS varie de 10W (sans charges) à 150W (pendant le traitement). Cette faible consommation en énergie est due au convertisseur piézoélectrique qui est très efficace comparé à un transducteur magnétostrictif. Pour les transducteurs magnétostrictifs, une grande partie de l'énergie électrique est convertie en chaleur, c'est pourquoi un système de refroidissement à eau est nécessaire.

Pour les convertisseurs piézoélectriques, plus efficaces, l'énergie électrique est principalement convertie en vibration mécanique, laquelle est ensuite transmise vers le pied de cordon de soudure. Un refroidissement à air est suffisant. La consommation électrique de l'équipement est la conséquence des paramètres listés ci-dessus ; elle n'a aucune signification particulière quant à la qualité du traitement UNP.

3.4. Géométrie et diamètres des percuteurs/aiguilles

Les percuteurs, également appelés aiguilles ou sphérils, sont généralement en acier dur.

La tête de martelage est généralement composée de 1 à 4 percuteurs (selon le fournisseur). SONATS propose 3 types de buses pour sa tête de martelage PMO3, lesquels sont illustrés ci-dessous, Figure 9.

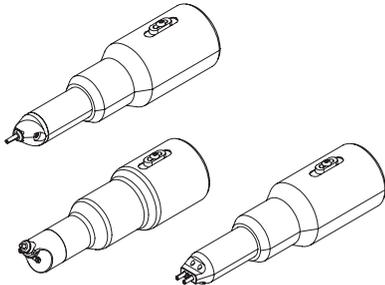


Figure 9 : Buse à 1 percuteur, buse à 1 percuteur à angle et buse à 2 percuteurs en ligne pour application UNP (SONATS)

Pour un contrôle parfait du traitement du pied de cordon de soudure, SONATS recommande d'utiliser une seule aiguille. Le nombre de percuteurs n'a aucune influence sur l'amélioration de la tenue en fatigue¹⁶. Une buse à 2 percuteurs en ligne pourrait être utilisée dans le cas d'un joint de soudure de qualité parfaite et pour le martelage des extrémités. La buse à angle est très efficace pour le traitement de pieds de cordons difficiles d'accès.

Le diamètre des percuteurs est généralement de 3 à 4 mm avec un rayon de 1,5 à 3 mm pour l'embout d'impact. SONATS propose 2 formes de percuteurs illustrées ci-après sur la Figure 10. Grâce à ces 2 types d'aiguilles, toutes les géométries admissibles peuvent être traitées sur tous les matériaux. Ces aiguilles sont en acier à roulements 100C6. Pour traiter l'acier inox ou le titane, il existe des aiguilles spéciales

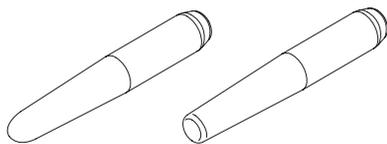


Figure 10 : percuteur de 1,5 mm de rayon et percuteur de 3,0 mm de rayon (SONATS)

4. RECOMMANDATIONS RELATIVES À LA FATIGUE

Ces paragraphes concernent les recommandations sur le procédé UNP émises par l'Institut international de la soudure (IIW), des sociétés de classification et des associations professionnelles sur des infrastructures de transport.

4.1. Recommandations de l'IIW



Concernant les méthodes de traitement post-soudage, le document suivant est considéré comme la référence à l'échelle mondiale :

"IIW Recommendations on Post Weld Fatigue Life Improvement of Steel and Aluminium Structures" (Recommandations de l'IIW sur l'amélioration de la tenue en fatigue post-soudage de structures en acier et en aluminium) ²².

Ce document a été créé afin de standardiser les méthodes d'application optimales de meulage, d'enrobage TIG et de martelage (percuteurs et aiguilles). Il inclut également des courbes de résistance théoriques basées à la fois sur la méthode d'évaluation de la contrainte nominale et sur la méthode de contrainte au point chaud structurel. Cette recommandation de l'IIW ne prend pas encore en compte la méthode de martelage par ultrasons (UNP). Cependant, en 2013, l'IIW a publié un ensemble de 2 documents complémentaires intitulés :

- Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed procedures and quality assurance guidelines¹
- Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines²³

SONATS recommande vivement à quiconque s'intéresse au procédé UNP de lire ces 2 documents.

Selon l'IIW, tout fournisseur qui respecte « les procédures proposées et les recommandations d'assurance qualité » peut garantir un facteur

d'amélioration x1,6 de la limite de fatigue, ce qui correspond à une amélioration de la classe de fatigue (jusqu'à 4 classes supérieures) (pour les aciers $f_y < 355$ MPa). La classe de fatigue augmente avec la résistance, tel qu'illustré sur la Figure 11. Cette recommandation apporte d'autres facteurs d'amélioration prenant en compte l'épaisseur, la résistance de l'acier et les effets de charge.

Comme on peut le voir sur la Figure 11, pour les aciers avec $f_y > 950$ MPa, plus de 8 classes FAT peuvent être gagnées.

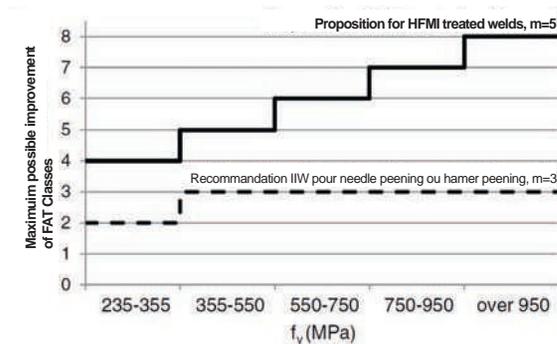


Figure 11 : Augmentation maximale du nombre de classes FAT proposée (par l'IIW) en fonction de la résistance de l'acier

4.2. Approches des sociétés de classification

La plupart des sociétés de classification ont déjà reconnue les avantages des méthodes de martelage par ultrasons (UNP) dans certaines conditions. Ce paragraphe présente brièvement les recommandations et directives relatives au procédé UNP.

4.2.1. American Bureau of Shipping – ABS



L'American Bureau of Shipping a mis à jour, en 2014, un document intitulé

“GUIDE FOR THE FATIGUE ASSESSMENT OF OFFSHORE STRUCTURES (APRIL 2003)”²⁴. On peut y lire:

« La forme finale d'une surface soudée traitée par martelage par ultrasons doit être régulière et toutes traces du pied de cordon de soudure doivent être éliminées. La profondeur de martelage sous la surface d'origine doit être maintenue à 0,2 mm minimum. La profondeur maximale ne doit

généralement pas dépasser 0,5 mm.

Si ces recommandations sont suivies, sur des courbes S-N de l'ABS, **la tenue en fatigue peut être augmentée de 2** si un meulage ou un martelage par ultrasons adapté est appliqué. Le crédit pour une autre mesure d'amélioration de la tenue en fatigue peut être octroyé si une étude spécifique au projet, bien documentée et prouvant l'avantage supposé de la technique à utiliser est fournie. »

4.2.2. Lloyd's Register – LR



Le tableau sur la page de droite, tableau 2, indique le facteur d'amélioration des méthodes post-soudure (dont l'UNP) d'après Lloyd's Register.

→

Fatigue Strength improvement factors		
Method	Improvement factor on fatigue life, fL	
Weld toes (see notes 1 to 7)		
Disc toe grinding	1.1	
Burr toe grinding	2.0	
TIG and plasma dressing	2.0	
Full burr grinding with smooth concave weld profile (see Fig 2.4.5)	3.0	
Hammer Peening	1.3	
Controlled Shot Peening	2.0	
Ultrasonic Peening (UP and Ultrasonic Impact treatment (UIT), see note 7)	25	minimum yield stress <315 N/mm ²
	35	minimum yield stress <315 N/mm ²
Free edge of parent material (see notes 2.4 and 8)		
Removal of plate corners, see note 8	1.6	Plate thickness, t<22 mm
	1.0	Plate thickness, t>66 mm
	Obtain by linear interpretation	66mm > t > 22 mm
NOTES		
1. Fatigue strength improvement factors only may be applied to as-welded transverse butt welds, as-welded T and cruciform welds and as-welded longitudinal attachment welds, see ShipRight Fatigue design Assessment Level 3 Procedure, Table T.2.1 in chapter 7.		
2. See Ch 2,2.1.2 for conditions of application of fabrication stage fatigue strength improvement methods.		
3. When a factor improvement of above 1.6 is applied to the weld toes, full penetration welds are to be used to eliminate the possibility of cracking the weld root. For a lower improvement factor, partial penetration welds in accordance with the Rules for Ships may be used. See 2.4.2.		
4. In way of areas prone to mechanical damage, fatigue improvement may only be granted if these are adequately protected.		
5. No improvement factor should result in a fatigue life longer than that calculated using the S-N curve given in Table 2.4.7		
6. Treatment of inter-bead toes will be necessary for large multi-pass welds. see 2.4.3, 2.4.4 and 2.4.6.		
UP and UIT may only be used on single pass electro-gas butt welds for plate thickness in the range from 50 mm to 80 mm.		
7. Improved factors may be applied in addition to the improved free edge S-N curves given in Table 7.1.1 in Chapter 7 of ShipRight Fatigue Design Assessment Level 3 procedure.		

Tableau 2 : Facteur d'amélioration de la tenue en fatigue pour différentes méthodes d'amélioration post-soudure (dont l'UIT) d'après Lloyd's Register

4.2.3. Bureau VERITAS

Les recommandations suivantes figurent, Figure 12 et 13, dans le document de BV « Rules for the Classification of Offshore Units » (Règles de classification des unités en mer).²⁵



Article 2 Post welding treatment

2.1 Scope

2.1.1 General

In normal design and building conditions, post welding treatments are not applied.

The decision to apply a post welding treatment may be required for specific hot spots, on a case-by-case basis, where the damage ratio is closed to the limit and in case of repair.

2.1.2 Conditions of application

Full penetration welding is to be adopted. Post welding treatment of partial penetrations is not accepted.

The post welding treatment procedure is to be performed according to a recognized standard and approved by the society.

2.1.3 Mechanical post welding treatment

The following mechanical post welding treatments are accepted:

- grinding
- shot peening
- needle peening
- ultrasonic peening

In principle, hammer peening is not accepted

2.1.4 Thermal post welding treatment

The following thermal post welding treatments are accepted:

- TIG refusion
- plasma refusion.

Figure 12 : Traitement post-soudure accepté par Bureau VERITAS

2.3 Fatigue resistance assessment

2.3.1 General

These treatments improve the weld toe and the residual stresses leading to an increase of the S-N curve class. The post weld S-N curve may have a different slope than the as welded S-N curve.

2.3.2 Assessment

The fatigue lifetime of the treated details is to be assessed taking into account the modified S-N curves. The used S-N curves are to be duly justified, by fatigue tests or by a recognized standard.

2.3.3 Experimental S-N curves

When tests are considered to determine the S-N curve, the test program has to be approved by the Society. Attention is to be paid to the necessary number of samples, and the distribution of the results along the stress range axis to allow a correct determination of the S-N curve slope and standard deviation. To be homogeneous with the Rules for as welded joints, the design curve will correspond to a curve, at minus 2 standard deviations, and taking into account confidence intervals of the calculated mean and standard deviation.

Figure 13: Procédure d'évaluation de la fatigue

4.3. Recommandation de l'AASHTO (American Association of State Highway and transportation officials) et de la FHWA (Federal highway Administration)

Aux États-Unis, de nombreux ensembles mécano-soudés sur les ponts existants sont sujets à des fissures dues à la fatigue des métaux. La Federal Highway Administration (FHWA) des États-Unis estime qu'il faut 76 milliards de dollars pour réparer les ponts défectueux à travers le pays.

En 1996, la Federal Highway Administration a lancé une étude visant à mesurer les bénéfices du traitement par impact par ultrasons (UIT) sur les assemblages soudés sujets aux défaillances²⁶. Leurs résultats ont montré que la durée de vie en fatigue des soudures où UIT était appliqué était 8 fois supérieure à celle où elles ne l'étaient pas. D'autres études ont été menées sur des poutres soudées et des plaques de recouvrement, donnant des résultats positifs similaires.

Des recherches ultérieures menées par l'Université de Purdue en 2018 ont montré que le martelage par ultrasons est une technique très efficace pour augmenter la durée de vie en fatigue des poutres métalliques soudées. L'étude a récemment été étendue pour prouver que l'équipement fabriqué par Empowering Technologies est approuvé comme une option fiable pour les applications de martelage par ultrasons. Les recommandations de l'AASHTO : « AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications » ont été modifiées en tant que telles dans les révisions intermédiaires de 2020 publiées en septembre 2019.

Empowering Technologies et ses partenaires se sont engagés à soutenir la réparation du pont de notre pays en augmentant la durée de vie en fatigue des éléments soudés et en réduisant le coût des réparations futures des soudures.

“AASHTO - Interim Revision (2020) to the LRFD Bridge Construction Specifications - 4th Edition 2017”

5. RÉSULTATS AVEC L'ÉQUIPEMENT SONATS UNP

5.1. Études publiées

SONATS bénéficie d'une expérience longue de plus de 20 ans dans la recherche sur le traitement de surface par impact activé par ultrasons. La plupart de ces programmes de recherche ont été conduits sous accords de confidentialité avec les clients finaux.

Ce paragraphe présente quelques études publiées relatives à l'équipement de martelage par ultrasons (UNP) de SONATS.

5.1.1. Amélioration de la tenue en fatigue de structures soudées grâce au procédé STRESSONIC® UNP 16

L'institut de soudure français, en collaboration avec SONATS, a conduit une étude dont l'objectif était d'évaluer la capacité du procédé de martelage par ultrasons à augmenter la tenue en fatigue de composants soudés. Les résultats de cette étude ont été présentés lors de la Conférence ICSP11 (Indiana, USA - 2011).

Programme expérimental :

Les échantillons étaient des soudures en T d'acier S355J2. Leur forme est illustrée ci-dessous sur la Figure 14.

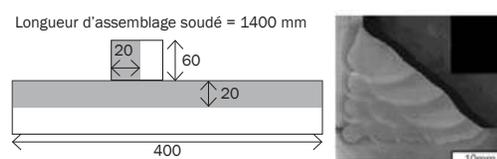


Figure 14 : Forme de la soudure en T et micrographie illustrant le soudage en plusieurs passes

Les échantillons ont ensuite été martelés (aiguilles) par l'équipement SONATS selon 4 combinaisons de paramètres présentés dans le tableau 3. La Figure 15 est une photo de l'équipement en cours d'utilisation.

Parameters	c#1	c#2	c#3	c#4
Needle quantity	3	3	1	1
Needle Type (tip radius)	S3-15 (3mm)	S3-13 (1.5mm)	S3-15 (3mm)	S3-13 (1.5mm)
vibration	60 μm p/v	60 μm p/v	60 μm p/v	60 μm p/v
Travel velocity	8mm/s	8mm/s	8mm/s	8mm/s
Shifted Pass Quantity	2	2	2	2

Tableau 3 : Paramètres de traitement



Figure 15 : Martelage par ultrasons du pied de cordon

Chaque échantillon a subi un test de fatigue à l'aide d'une plieuse à 4 points avec un ratio de contrainte R=0,1 et un signal sinusoïdal de 20 Hz. D'autres échantillons ont été produits pour les mesures des contraintes résiduelles effectuées par diffraction de rayons X et les mesures de rugosité avec un profilomètre 2D. 45 échantillons ont subi les tests de fatigue (9 non traités par martelage et 36 traités par martelage).

Résultats :

Conformément aux attentes, le traitement par martelage par ultrasons a créé une déformation plastique des pieds de cordons de soudures en générant une rainure le long de ces derniers. Pour chaque combinaison de paramètres, des contraintes de compression résiduelles ont été observées (voir Figure 16).

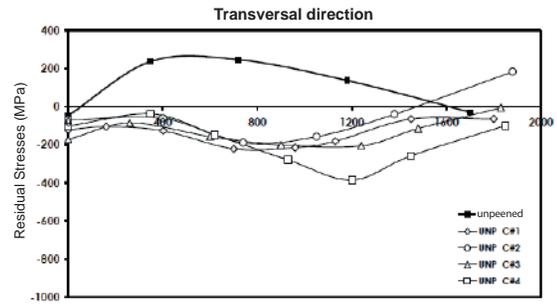
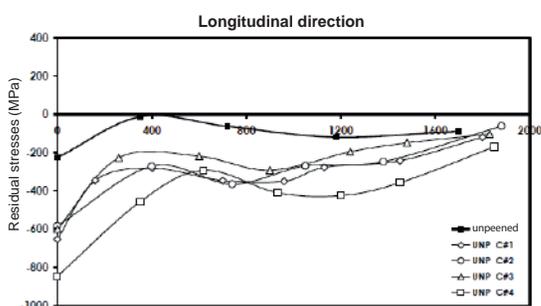


Figure 16 : Residual stress profiles in the longitudinal and transversal direction for as welded and UNP specimens

Pour chaque combinaison de paramètres, une amélioration de la tenue en fatigue est observée par rapport aux résultats des échantillons non traités (voir Figure 17).

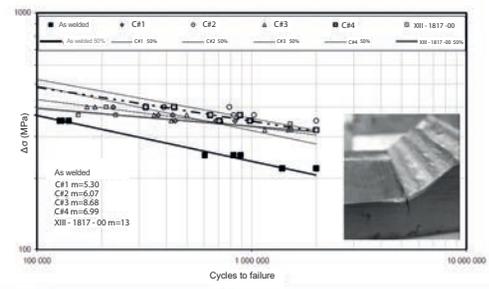


Figure 17 : Résultats des tests de fatigue pour les échantillons non traités, traités par UNP et publication de l'IIW²⁸

	Martelé	XIII-1817-00 Martelé	XIII-1817-00 UIT Set2-5mm	C#1	C#2	C#3	C#4
Médiane	206	188	314	279	319	305	316
Caractéristique courbe	197	167	286	251	291	291	298

Figure 18 : Plage de contraintes à 2 millions de cycles

Les résultats indiquent une amélioration allant jusqu'à 50 % de la plage de contraintes à 2 millions de cycles. La tenue en fatigue a été améliorée au minimum par un ratio de 3 et jusqu'à 5 pour une plage de contraintes de 350 MPa. La condition UIT, combinaison 2 de l'étude XIII-1817-00 a été utilisée pour comparaison et validation du travail en cours. Les résultats de ces deux études sont similaires. Quels que soient les combinaisons de paramètres, une amélioration significative a été observée pour tous les échantillons. Ceci démontre la faible influence de différents paramètres tels que le rayon des aiguilles ou leur nombre.

5.1.2. Comportement des fixations longitudinales martelées à haute fréquence soumise à la fatigue²⁹

L'objectif de cette étude est d'évaluer la résistance à la fatigue du procédé UNP sur des soudures longitudinales en flexion avec un ratio de contrainte $R = 0,1$.

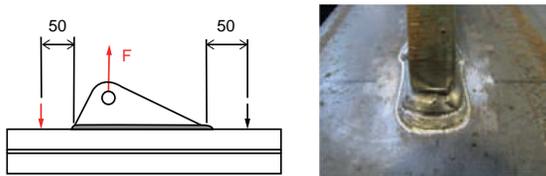


Figure 19 : Forme de l'échantillon et pied de cordon traité

Six échantillons traités, Figure 19, et un échantillon non traité ont été testés à un niveau de charge fixe. Les résultats ont été comparés à des études précédentes sur les mêmes échantillons avec différentes améliorations de soudure, figure 20.

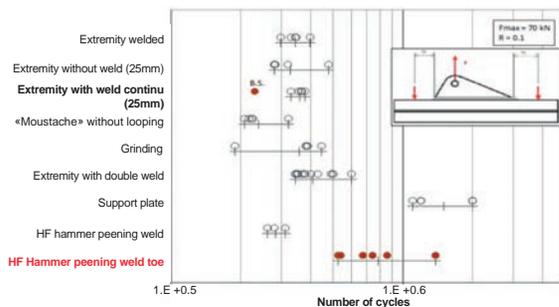


Figure 20 : Tenue en fatigue observée sur une soudure longitudinale après différents traitements post-soudage dont l'UNP (de SONATS)

Tel qu'illustré sur la Figure 20, si l'on compare les résultats du martelage HF (SONATS) avec les résultats des échantillons non traités, on observe une tenue en fatigue moyenne égale à 740 000 cycles pour le procédé UNP contre 320 000 cycles pour les échantillons non traités. Cela correspond à un facteur d'amélioration de la tenue en fatigue de 2,3.

5.1.3. Amélioration de la tenue en fatigue des structures soudées par martelage activé par ultrasons comparée à l'enrobage TIG³⁰

Deux techniques d'amélioration ont été étudiées :

- Enrobage TIG
- Martelage par ultrasons

Ces traitements post-soudage ont pour but, dans les nouvelles structures, d'augmenter la résistance à la fatigue et sont également destinés à des interventions post-réparation ou à l'amélioration de structures de constructions navales existantes.

Procédures expérimentales :

Le matériau considéré pour ce travail est l'acier S355 NL laminé à chaud, grade fréquemment utilisé dans les constructions navales de surface par DCNS.

Les dimensions de la plaque sont 3000 mm de longueur, 700 mm de largeur et 12 mm d'épaisseur. La Figure 21 illustre la géométrie de l'échantillon avant usinage.

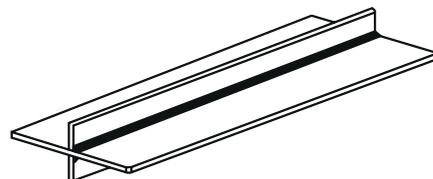


Figure 21: Fixation ne portant pas de charge soudée sur une plaque de 12 mm d'épaisseur

La soudure est ensuite traitée par procédé SONATS (voir Figure 22) avant usinage des échantillons de fatigue.



Figure 22 : Équipement de martelage par ultrasons (UNP) de SONATS et son utilisation

Les échantillons après usinage sont des plaques rectangulaires (400 mm de long et 80 mm de large).

Des tests de fatigue ont été conduits sur des échantillons traités par TIG et UNP, sous chargement axial sur des machines électrohydrauliques à 5-10 Hz selon la contrainte maximale appliquée.

Résultats :

Les contraintes résiduelles ont été mesurées dans la zone traitée par UNP (voir Figure 23).

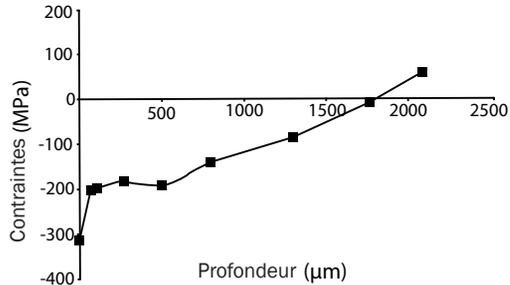


Figure 23 : Mesure de contraintes résiduelles par diffraction de rayons X

Des contraintes de compression résiduelles sont observées jusqu'à 1,7 mm de profondeur après traitement par UNP.

La Figure 24, page suivante, résume les courbes $\Delta\sigma-N$ à 2sdtv pour les deux traitements post-soudage et les échantillons non traités. Les résultats sont obtenus en traction-compression $R=-1$. Le tracé rouge correspond à la courbe théorique FAT 100 MPa selon la recommandation de l'IIW.

Une importante amélioration est observée pour les deux méthodes, mais de meilleurs résultats sont obtenus avec le procédé UNP. Selon les auteurs, le FAT calculé pour les échantillons non traités est de 137 MPa, 254 MPa pour l'enrobage TIG et 357 MPa pour l'UNP.

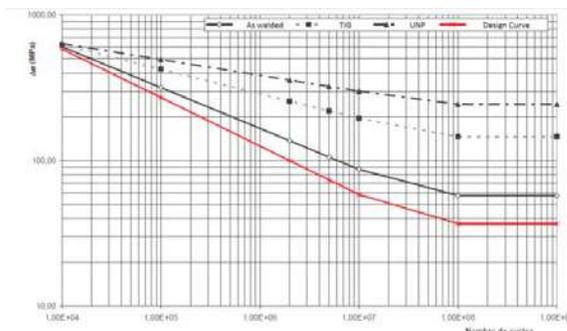


Figure 24 : Courbes $\Delta\sigma-N$ pour les échantillons non traités et traités par enrobage TIG et UNP

5.1.4. US Navy : étude systématique des paramètres UIT sur les contraintes résiduelles sur l'alliage AA5456 sensibilisé et mesures des contraintes résiduelles sur le terrain pour anticiper et limiter les fissures de corrosion sous contrainte³¹

Cette thèse étudie l'utilisation de la diffraction de

rayons X pour mesurer les contraintes résiduelles autour des soudures sur des structures de navires en aluminium à la fois en laboratoire et sur le terrain. Des contraintes résiduelles de tension sont souvent générées lors du soudage et, sur des structures en aluminium sensibilisées, peuvent entraîner d'importantes fissures de corrosion sous contrainte. Les techniques de martelage, telles que le traitement par impacts d'ultrasons (UIT de SONATS), peuvent limiter, voire inverser, ces contraintes résiduelles de tension. Cette recherche utilise la diffraction de rayons X pour mesurer les contraintes résiduelles autour des soudures sur l'alliage AA5456 avant et après traitement UIT. On a notamment noté l'importance des paramètres UIT tels que l'amplitude de martelage et la taille d'aiguille. L'auteur a constaté que toutes les combinaisons de paramètres UIT ont permis d'éliminer les contraintes résiduelles de tension et ont généré une contrainte de compression plusieurs centaines de microns sous la surface de la soudure. Le niveau exact de contrainte résiduelle de compression dépendait de la taille d'aiguille utilisée avec une plus petite, mais mesurable, dépendance de l'amplitude de déplacement.

5.1.5. Amélioration de la tenue en fatigue des assemblages soudés en acier et aluminium par Martelage Ultrasons

Fraunhofer IWM (Fribourg, Allemagne), étudie le martelage ultrasons sur des structures en acier et en aluminium. Les tests de la tenue en fatigue ont été conduits dans le laboratoire de FRAUNHOFER sur des éprouvettes soudées bout à bout composées de S355J2+M, S690QL et EN AW5754 (AlMg5), Figure 25. Les essais de fatigue ont été réalisés à une amplitude constante, $R=0.1$ et sous un chargement uniaxial.

Éprouvette S355

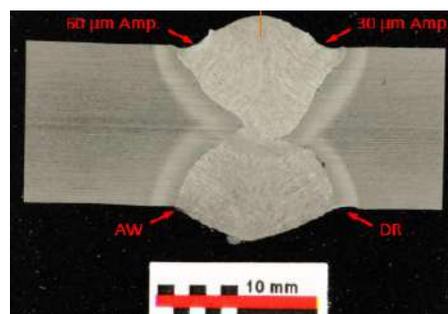
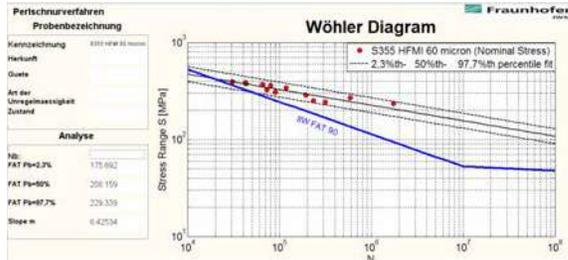


Figure 25 : Coupe macrographique d'une soudure bout à bout traitée à 60µm d'amplitude, 30µm d'amplitude, brute de soudage (AW) et avec un double rayon (DR)

Sur les éprouvettes S355, le traitement standard avec un impacteur de 3 mm de diamètre a été comparé à un traitement avec des embouts de nouvelle géométrie que l'on appelle « Double radius peen » ou « Double rayon ». Les courbes de fatigues sont représentées sur la page suivante :



Fatigue 26 : Courbe de fatigue sur éprouvettes S355 brutes de soudage

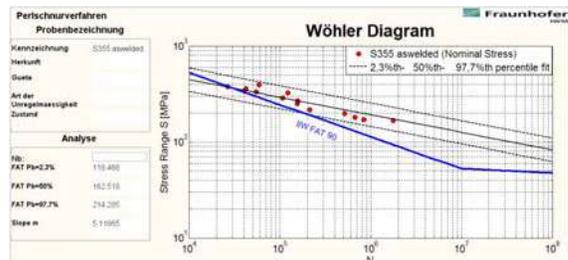


Figure 27 : Courbe de fatigue sur éprouvettes S355 martelées avec des paramètres standards

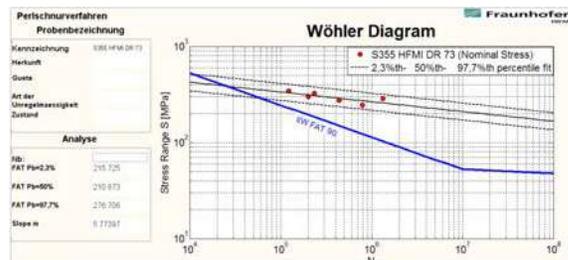


Figure 28 : Courbe de fatigue sur éprouvettes S355 , UNP with «Double Radius Peen»

Le tableau suivant résume les résultats obtenus sur les éprouvettes de type S355 en fonction du traitement après soudage.

S355J3+M	FAT (+2.3%)	% of FAT Improvement (to AW)
IIW Recommendation	90 Mpa	-
Brut de soudage	118 Mpa	-
Avec UNP (Paramètres standards)	176 Mpa	49%
Avec UNP (Embout à double rayon)	216 Mpa	83%

S690 SPECIMENS

Durant la phase de soudage, la limite élastique de l'acier a peu d'influence sur la limite de la tenue en fatigue de l'assemblé soudé. Cependant, lorsqu'un traitement de martelage est appliqué post-soudage, l'amélioration de la tenue en fatigue augmente avec la limite élastique. Le niveau d'amélioration doit donc être supérieur pour des éprouvettes S690 par rapport à des éprouvettes en S355.

FRAUNHOFER a testé le martelage par ultrasons sur des éprouvettes soudées en bout à bout en S690. Les résultats en fatigue sont présentés sur les graphiques suivants, Figures 29 à 30 :

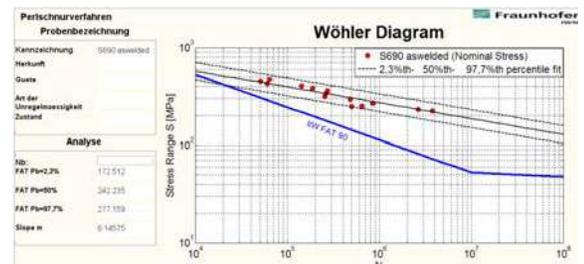


Figure 29 : Courbe de fatigue sur éprouvettes S690 brutes de soudage

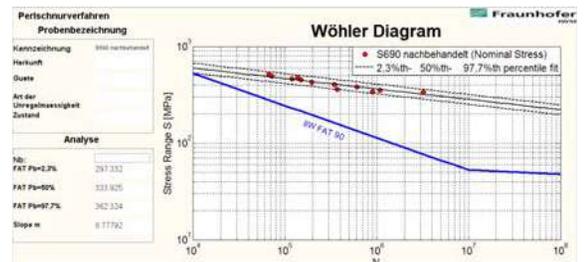


Figure 30 : Courbe de fatigue sur éprouvettes S690 martelées avec des paramètres standards

Par rapport aux éprouvettes brutes de soudage, nous observons une amélioration de 70% de la FAT(2.3%) après martelage par ultrasons, a noté que la dispersion des résultats a de plus fortement réduit.

EN AW 5754 SPECIMENS

L'effet du traitement HFMI sur des assemblages acier a été largement étudié ces 30 dernières années. Pour l'aluminium, seulement quelques études ont été réalisées, pour cette raison SONATS et FRAUNHOFER ont testé l'effet du martelage sur des soudures bout à bout en aluminium EN AW 5754.

Les courbes de fatigue sont présentées en figure 31 et 32.

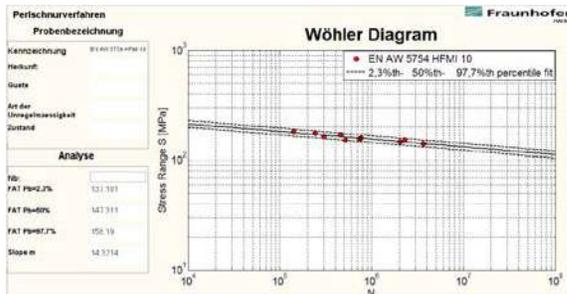


Figure 31 : Courbe de fatigue sur éprouvette EN AW 5754, martelés avec des paramètres standards

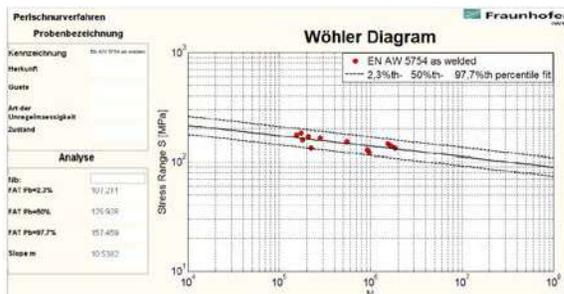


Figure 32 : Courbe de fatigue sur éprouvette EN AW 5754, brut de soudage

Grâce au martelage ultrasons, la FAT passe de 107MPa à 137Mpa soit une augmentation de 28%. De plus nous observons une dispersion nettement plus faible après martelage.

Les tests de fatigue ont été conduits par FRAUNHOFER IWM, sur 3 matériaux différents. Une forte amélioration de la résistance en fatigue a été observée pour tous les matériaux (S355J2+M, S690QL et EN AW5754 (AlMg5)).

Les premiers tests de fatigue utilisant un embout à double rayon montrent un gain en fatigue supérieur de plus de 20% par rapport au martelage ultrason standard (83% par rapport au brut de soudage)

La raison de cette plus forte amélioration est probablement due à une faible pénétration dans le pied de cordon combiné à une très faible rugosité dans le sillon martelé (Figure 33).

■ Parameter measured with 3D-Laserscanner

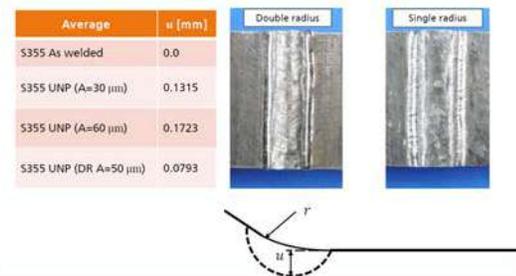


Figure 33 : Profondeur du sillon dans le métal de base (u) après martelage selon différents paramètres et aspect

5.1.6. Amélioration de la durée de vie en fatigue de poutres soudées de ponts par traitement HFMI³²

La durée de vie en fatigue des joints soudés peut être améliorée par divers procédés de post-traitement.

Une des méthodes les plus efficaces est le traitement de martelage haute fréquence (High Frequency Mechanical Impact, HFMI). Ce procédé peut être utilisé pendant la fabrication, mais les meilleurs effets sont obtenus pour des applications de réparation ou de maintenance. Des recherches précédentes ont démontré l'efficacité des équipements fonctionnant à 27 KHz pour améliorer la durée de vie en fatigue des zones soudées de poutres de ponts (Fisher and Roy, 2003).

En collaboration avec l'Université de PURDUE (Indiana, USA), SONATS a mené à bien un projet pour démontrer l'efficacité du procédé SONATS (20KHz) sur les raidisseurs transversaux et les plaques de doublage. Ces détails soudés sont très présents sur les ponts américains et sont des sites très préférentiels.

Dans cette étude, 14 poutres (échelle 1:1) présentant des raidisseurs transversaux et des plaques de doublage soudés ont été soumises à des chargements cycliques d'amplitude constante. Le but étant de quantifier l'amélioration de la résistance en fatigue apporté par l'équipement HFMI produit par SONATS.



La matrice d'essais prend en compte plusieurs étendues de contraintes ($\Delta\sigma$) et plusieurs contraintes minimum.

Les résultats des essais de fatigue montrent que :

- Les raidisseurs transversaux soudés passent de la catégorie AASHTO C' à B
- Les plaques de doublage soudées passent d'une catégorie AASHTO E' à C

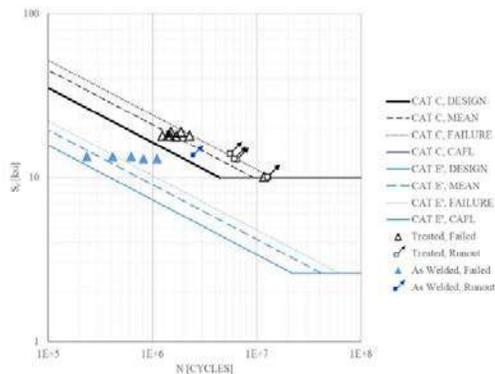


Figure 34a: Courbe S-N pour les plaques de doublage

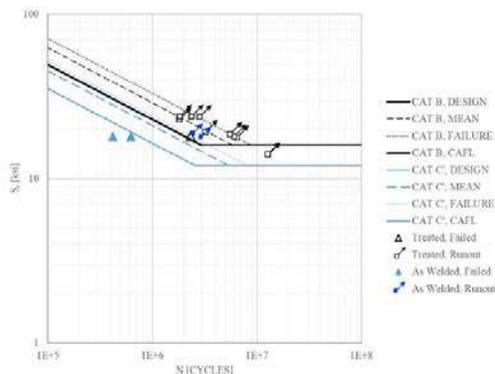


Figure 34b: Courbe S-N pour les raidisseurs transversaux

Ces résultats permettent d'étendre les alternatives disponibles pour les propriétaires de pont recherchant des solutions pour étendre la durée de vie de leurs ponts en service.

Plus de détails sur : <https://docs.lib.purdue.edu/sbritereports/4/>

5.2. Études en cours

5.2.1. Société Nationale des Chemins de Fer - SNCF - France

Tel que présenté dans le document de l'IIW XIII-2545-14³³, la SNCF conduit actuellement une étude. Celle-ci a pour but d'établir les critères de fatigue pour les soudures d'angle traitées par martelage par ultrasons sous des sollicitations de service observées fréquemment. Des échantillons en acier à grain fin sont testés selon deux ratios de contrainte. Le programme se terminera par des tests de fatigue sur des composants à taille réelle

5.2.2. Décryptage des mécanismes liés à l'effet du martelage sur des structures soudées soumises à la fatigue

En collaboration avec le CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques), centre de recherche composé d'experts, et d'autres sociétés, SONATS participe à un programme de recherche dont l'objectif est de comprendre l'effet du procédé UNP sur les structures soudées.

Si tous les résultats, principalement issus de la littérature, suggèrent que le martelage traditionnel ou HFMI pourrait être la meilleure solution pour améliorer la résistance à la fatigue, concernant la réparation de soudures fissurées ou endommagées par la fatigue, certaines questions subsistent :

- Quelle est l'efficacité du martelage HFMI pour les différents types de fatigue (cycles faibles, endurance limitée ou cycles élevés) ?
- Quels sont les paramètres d'influence (contrainte résiduelle, géométrie du pied de cordon, durcissement...) ?
- Quels sont les mécanismes impliqués ?

En résumé, l'étude en cours est la suivante : « Pourquoi, comment et sous quelles conditions de sollicitations le martelage HFMI est-il efficace sur les structures soudées ? ».

5.2.3. COMPORTEMENT DES ENSEMBLES SOUDÉS À L'ARC SOUMIS À LA FATIGUE : VOIES D'AMÉLIORATION ³⁴

Afin de tirer avantage des aciers à très haute résistance (AHSS) dans l'industrie automobile, ARCELORMITAL aimerait proposer à ses clients une méthode de traitement post-soudage efficace et robotisée. L'épaisseur des échantillons testés est de 2 mm (telle qu'actuellement observée dans l'industrie automobile).

En premier lieu, plusieurs méthodes d'amélioration post-soudage ont été testées, et l'enrobage TIG et le procédé UNP de SONATS ont été choisis en raison de l'importante amélioration de la tenue en fatigue observée après traitement par ces techniques. Des tests supplémentaires sont en cours afin de confirmer les résultats précédents.

6. EXPÉRIENCE SONATS

SONATS a été fondée en 1991 et compte plus de 20 ans d'expérience dans les mesures de contraintes résiduelles et les traitements par impacts de surface activés par ultrasons pour l'amélioration de la tenue en fatigue. Ce paragraphe présente quelques exemples de notre expérience sur des projets utilisant le procédé UNP.

6.1. Structure de génie civil

Le NOMAD UNP est une solution portable facile d'utilisation qui a été adoptée par la Port Authority de New York pour prolonger la durée de vie du tablier structurel supérieur du George Washington Bridge (2014), Figure 34 ci-dessous. Des interventions par UNP à grande échelle ont été conduites par l'entrepreneur American Bridge pendant environ un an (voir American Bridge Journal - AB Connections, été 2012 sur www.americanbridge.net). Outre ce remarquable exemple, StressVoyager[®] UNP a été utilisé pour des réparations de ponts, ou sur des ponts neufs, aux États-Unis, au Canada, en Europe et en Asie.



Figure 35 : George Washington Bridge

6.2. Engins lourds

Des fabricants d'équipements de construction de transports lourds ont fait appel à SONATS/ ETI. Leur but était d'obtenir une solution leur permettant de garantir une qualité optimale des soudures au niveau de structures et d'assemblages soudés critiques.

Le procédé UNP a été ajouté par nos clients finaux dans leurs spécifications comme méthode d'amélioration de la résistance à la fatigue et de prolongation de la durée de vie de chargeuses de pneus (Figure 35).



Figure 36 : Exemple de pièce de chargeuse sur pneus

6.3. Constructions navales

Certains fabricants ont fait appel à SONATS afin de traiter par martelage par ultrasons la zone soudée critique de plusieurs gouvernails de pétroliers des mers nordiques afin d'améliorer leur résistance à la fatigue et de prolonger leur durée de vie.



Figure 37 : Nordic Sea Tanker Rudder repair

SONATS a fourni un service UNP sur site afin d'éviter les fissures dues à la fatigue et aux contraintes de tension. Le traitement a été très efficace car depuis, aucune fissure n'a été constatée (Figure 36).

Outre cet exemple de projet de réparation, SONATS et sa filiale américaine EMPOWERING TECHNOLOGIES ont été contactées pour traiter des structures navales neuves et anciennes (en acier ou en aluminium).

6.4. Énergie

L'équipe de services techniques de SONATS a été appelée par le département d'étude d'un client afin d'évaluer la faisabilité de l'introduction de contraintes de compression bénéfiques sur des zones soudées critiques.

L'objectif était d'augmenter la résistance maximale à la charge sur une conception définie d'éolienne afin de l'adapter à des conditions d'application différentes. SONATS a déployé une équipe d'ingénieurs et d'opérateurs UNP pour collaborer avec cette société d'énergie éolienne afin de traiter les raccords soudés sur une nacelle dans des environnements de travail difficilement accessibles (Figure 37).



Figure 38 : Wind turbine nacelle

Les travaux sur la nacelle d'éolienne ont duré deux semaines et nécessité l'intervention de deux équipes.

6.5. Défense

SONATS a développé un dispositif unique capable de traiter par martelage par ultrasons une zone soudée très étendue sur des cadres en aluminium de véhicules motorisés amphibies. Ce dispositif permet d'obtenir une qualité de finition de surface élevée et d'améliorer la résistance à la corrosion.



Figure 39 : Cadre en aluminium d'un équipement militaire amphibie lourd

6.6. Solutions de martelage automatisées

SONATS / ETI développe actuellement un dispositif robotisé afin d'intégrer la technologie UNP dans un processus automatisé, contrôlé et répétable (Figure 39).



Figure 40 : UNP robotisé sur un châssis de véhicule automobile

7. RÉFÉRENCES

- 1 - P. J. Haagensen and S. J. Maddox, IIW Recommendations on Post Weld Fatigue Life Improvement of Steel and Aluminium Structures XIII-2200r7-07, 2007
- 2 - A. V. Mordvintseva "Ultrasonic treatment of welded joints" - "Ultrasound application in welding" MMoscow, CLTI NIIE of Electrical Industry, 1959, pages 32-43.
- 3 - I.I. Mukhanov, Yu. M. Golubev, V.N. Philimonenko "Ultrasonic strengthening of machine steel parts" -Proceedings of the Novosibirsk Science and Technology Conference on Machine Building, ch. 1. Novosibirsk: NTO Mashprom, 1964, p. 27-39.
- 4 - Langenecker, Effect of Sonic and Ultrasonic Radiation of Safety Factors of Rockets and Missiles, "Journal AIAA", № 1, 1963.
- 5 - E. Kononov, V. Drozdov, M. Tyavlovsky "Dynamic strength of metals", "Science and Engineering" Publishing House, Minsk 1963, 300 pages.
- 6 - V.I. Trufiyakov, E.S. Statnikov, P.P. Mikheev and A.Z. Kuzmenko The Efficiency of Ultrasonic Impact Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, 1998, IIW Document XIII-1745-98
- 7 - P. J. Haagensen¹, E.S. Statnikov² and L. Lopez-Martinez³ - Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including Ultrasonic Impact Treatment (UIT), 1998 ,IIW Doc. XIII-1748-98.
- 8 - P.Castellucci ,V.I.Troufiakov, P.P. Mikheev ,E.CH. Statnikov – Le martelage par ultras-sons des soudures en acier HLE – Soudage et techniques connexes Mai/Juin 1991
- 9 - E.CH. Statnikov, V.I. Trufiyakov, P.P. Mikheev and Yu.F. Kudryavtsev. Specification for weld toe improvement by ultrasonic impact treatment. IIW Doc. XIII – 1617 - 96. (1996)
- 10 - E.S. Statnikov. Guide for application of UIT improving fatigue life of welded structures. IIW/IIS Doc. XIII – 1757 – 99(1999).
- 11 - M.M. Pedersen, O.Ø. Mouritsen, M.R. Hansen, J.G. Andersen, J. Wenderb. Comparison of Post Weld Treatment of High Strength Steel Welded Joints in Medium Cycle Fatigue XIII-2272-09, 2009
- 12 - André Galtier, Efim Statnikov , The Influence of ¹³Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Behavior of Welded Joints in High-Strength Steel, IIW/IIS Document XIII - 1976 – 03, 2003
- 13 - Halid Can Yildirim & Gary B. Marquis, A round robin study of high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joints subjected to variable amplitude loading, Weld World (2013) 57:437–447
- 14 - Rana Tehrani Yekta, Kasra Ghahremani, Scott Walbridge, Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of ultrasonic impact treated welds – International journal Of fatigue - 2013
- 15 - Gary Marquis & Zuheir Barsoum, Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed procedures and quality assurance guidelines, Weld World DOI 10.1007/s40194-013-0077-8, 2013
- 16 - V.Desfontaines , P. Montherat , F. Chateau , O. Brière, Fatigue Life Enhancement of Welded Structures using STRESSONIC® Ultrasonic Needle Peening - ICSP11 - Feb. 2011
- 17 - V.I. Trufiyakov, P.P. Mikheev, Yu. F. Kudryavtsev and D.N. Reznik, Fatigue Endurance of Welded Joints, Residual Stresses and Fatigue Improvement Treatments, Paper presented at the Ship Structures Symposium '93, 1993
- 18 - E S Statnikov, Vladislav Korostel, Nikolay Vekshin, G Marquis, Development of Esonix ultrasonic impact treatment techniques, XIII-2098-06 ,2006
- 19 - Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, A. Lugovskoy, L. Lobanov, V. Knysch, O. Voitenko, G. Prokopenko, Rehabilitation and Repair of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Peening, IIW Document XIII-2076-05, 2005
- 20 - Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, A. Lugovskoy, G. Prokopenko, Fatigue Life Improvement of Tubular Welded Joints by Ultrasonic Peening, IIW Document XIII-2117-06 2006
- 21 - Luis Lopez Martinez , Per J. Haagensen, LIFE EXTENSION OF CLASS F and Class F2 DETAILS USING ULTRASONIC PEENING, IIW Doc. XIII-2143, 2006
- 22 - P. J. Haagensen and S. J. Maddox, IIW Recommendations on Post Weld Fatigue Life Improvement of Steel and Aluminium Structures, XIII-2200r7-07 (Revised 06 July 2010)
- 23 - Gary B. Marquis , Eeva Mikkola, Halid Can Yildirim, Zuheir Barsoum , Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines, Weld World DOI 10.1007/s40194-013-0075-x, 2013
- 24 - American Bureau of Shipping, Commentary on the guide for the Fatigue assessment of offshore structures, April 2003 Updated in July 2014
- 25 - Bureau VERITAS, Rules for the Classification of Offshore Units, May 2014 edition
- 26 - William Wright, PE - Post-Weld treatment of a welded bridge girder by Ultrasonic impact Treatment, 1996
- 27 - Sougata Roy , John W. Fisher, Ben T. Yen, Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT), International Journal of Fatigue 25 (2003) 1239–1247
- 28 - E.S. Statnikov, V.O. Muktepavel, V.I. Trufiyakov, P.P. Mikheev, A.Z. Kuzmenko, A. Blomqvist, Efficiency Evaluation of Ultrasonic Impact Treatment (UIT) of Welded Joints in Weldox 420 Steel in accordance with the IIW Program, 2000
- 29 - I. Huther, H.P Lieurade, Work in progress France related to fatigue of welded components and structures, IIW Doc XIII-2436-12, 2012
- 30 - Hui, J. F., Lloyd, J. B., & Connor, R. J. (2018). Fatigue life improvement of welded girders with ultrasonic impact treatment. West Lafayette, IN: Purdue University. <https://doi.org/10.5703/1288284316654>
- 31 - Marc Bousseau, Thierry Millot, Fatigue life improvement of welded structures by ultrasonic needle peening compared to TIG dressing, IIS/IIW Commission XIII DOC XIII-2125-06, 2006
- 32 - M. E. Haggett, Thesis: SYSTEMATIC REVIEW OF UIT PARAMETERS ON RESIDUAL STRESSES OF SENSITIZED AA5456 AND FIELD BASED RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS FOR PREDICTING AND MITIGATING STRESS CORROSION CRACKING, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL March 2014
- 33 - I. Huther, HP. Lieurade, Work in progress in France related to fatigue of welded components and structures, IIW Doc XIII-2545-14, 2014
- 34 - Michel Duchet, Matthieu Amblard, Laurent Cretteur, Stéphanie Michaut, Jacques Goudemez, Bastien Weber, Olivier Brière, Vincent Desfontaine, FATIGUE BEHAVIOUR OF ARC WELDED ASSEMBLIES: PATHS OF IMPROVEMENT, Fatigue design 2011



**EUROPE
TECHNOLOGIES**

SONATS

2 Rue de la Fonderie - B.P 20536
44475 CARQUEFOU CEDEX - FRANCE
Tel. : +33 (0)2 51 70 04 94
Fax : +33 (0)2 51 70 05 83
E-mail : contact@sonats-et.com

www.sonats-et.com