

# Incidence de la température du début de forgeage sur la ZDTM au cours d'une opération de soudage par friction rotative

Assia HAMIDAT<sup>(a\*)</sup>, Ammar JABBAR HASSAN<sup>(a)</sup>, Taoufik BOUKHAROUBA<sup>(a)</sup>, Salah RAMTANI<sup>(b)</sup>

- a. Laboratoire de Mécanique Avancée “LMA”, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. BP. 32, El-Alia, 16111 Bab-Ezzoaur, Algiers – Algeria  
[hamidat.assia@gmail.com](mailto:hamidat.assia@gmail.com), [t.boukha@gmail.com](mailto:t.boukha@gmail.com)
- b. Laboratoire CSPBAT - LBPS, UMR CNRS 7244, Université Paris 13, Institut Galilée 99, avenue J. B. Clément 93430 Villetaneuse, France [ramtani@univ-paris13.fr](mailto:ramtani@univ-paris13.fr)

## Résumé :

*L'évolution des propriétés mécaniques de l'acier AISI 316 lors du soudage par friction directe, dépend essentiellement du flux de chaleur généré et qui dépend de trois grandeurs : la vitesse de rotation, la pression de friction et le temps de la seconde étape de la phase de friction (2<sup>ème</sup> EPF). Par ce travail on a cherché à optimiser le temps de la 2<sup>ème</sup> EPF en vue d'obtenir une microstructure la plus proche de celle du métal de base.*

*A la lumière des résultats obtenus, nous observons que la microstructure finale du joint soudé dépend en grande partie celle qui va naître à la fin de la 2<sup>ème</sup> EPF, sous l'effet du flux de chaleur et de la pression de friction. Ce couple (chaleur + effort) va transformer thermo-mécaniquement et profondément la microstructure du AISI 316 qui aura des incidences sur celle qui va composer le joint soudé.*

**Mots clefs : Friction rotative, Microstructure, Micro-Dureté, Propriétés mécaniques**

## 1 Introduction

L'avantage du soudage par voie solide est l'élimination des problèmes de fissuration à chaud et de criques [1]. Un métal d'apport n'est pas nécessaire, ce qui évite la formation de phases dures et fragilisantes. Le joint soudé reste homogène chimiquement, ce qui constitue un avantage du point de vue de la corrosion [1]. L'équipement utilisé est simple, demande peu de maintenance et peu de qualification pour le fonctionnement. Globalement, le procédé est propre, sans fumées, peu dangereux, rapide et automatisé ce qui garantit la maîtrise de ses paramètres [2 - 4]. A titre d'exemple, dans notre cas, l'opération de soudage la plus longue n'excède pas les 20s.

Ce procédé associe à la fois l'effet mécanique et thermique. L'effet mécanique est essentiellement fonction de la pression de friction et l'effet thermique dépend de la quantité du flux de chaleur à diffuser. L'effet mécanique prend naissance au début de la friction, avant la montée de la température

au-delà de la température ambiante (phase d'accostage) et prend fin au maximum de la température atteinte (1<sup>ère</sup> EPF) pour laisser place à l'effet thermomécanique (2<sup>ème</sup> EPF), ce dernier perdure jusqu'à la fin de la phase de forgeage.

En d'autres termes, l'histoire de l'évolution de la microstructure passe par quatre étapes formant les trois phases du soudage par friction direct : accostage, friction et forgeage [5 - 8]. Les futures propriétés mécaniques du joint soudé dépendent donc, de cette histoire. Cette manière de faire permet d'analyser séparément les deux effets, mécanique et thermique générés par l'opération de soudage, dans le but de quantifier le rôle de chacun sur l'évolution de la microstructure post-forgeage.

Les essais (traction), les mesures (micro-dureté) et les analyses (macro, EDX), montrent le rôle du flux de chaleur généré lors du procédé de soudage sur la microstructure mais aussi sur les propriétés mécaniques du joint soudé.

## 2 Partie Pratique

### 2.1 Matériau

La genèse du soudage par friction est simple. Au début de l'opération, deux pièces sont mises en contact, un couple résistant aux forces de friction appliquées apparaît et l'énergie qui en résulte est transformée en chaleur provoquant l'élévation de la température jusqu'à sa valeur maximale. Cette période est dénommée par la première étape de la phase de friction (1<sup>ère</sup> EPF) [9]. Par la suite, on assiste à la diffusion d'une partie de la chaleur accumulée le long de la 1<sup>ère</sup> EPF lors de laquelle une quantité de métal plastique commence à être refoulée sous l'effet de la rotation et la pression de friction de telle sorte que le bourrelet caractéristique du soudage commence à se former. Cette période, dénommée par la seconde étape de la phase de friction (2<sup>ème</sup> EPF) est responsable en grande partie de la future microstructure du joint soudé. D'un point de vue pratique, nous avons soudé l'acier inoxydable de la série AISI 316, dont la composition chimique, les caractéristiques mécaniques, physiques et la microstructure de base figurent respectivement dans les tableaux (1, 2 et 3) et la figure (1).

C	Mn	Si	P	S	Mo	Cr	Ni
0.04	1.50	0.67	0.03	0.021	2.93	17.93	9.95

Tableau 1: Composition chimique du métal de base (%)

Limite élastique 0.01% [MPa]	Contrainte maximale [MPa]	Module d'élasticité [MPa]	Allongement [%]	Moyenne de micro-dureté Hv <sub>0.1</sub>	Coefficient d'écrouissage (n)	Coefficient de résistance K [MPa]
578	670 - 680	1.93 10 <sup>5</sup>	45	260 -263	0.206	1146

Tableau 2: Caractéristiques mécaniques du métal de base

Densité [g/cm <sup>3</sup> ]	Résistivité électrique [microhm-cm] (20°C)	Chaleur spécifique [j/kg. °k] (0-100°C)	Conductivité Thermique [w/mk]
8.00	74	5.00	16.2

Tableau 3: Caractéristiques physiques du métal de base [10]

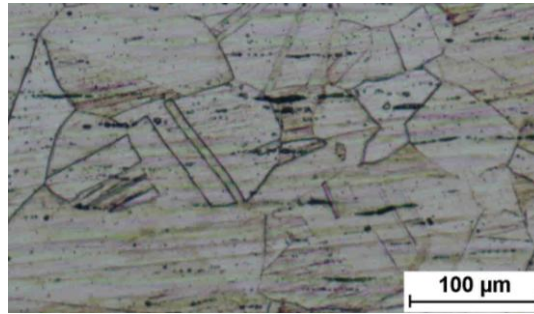


Figure 1 : Microstructure optique du métal de base

Le présent travail porte sur l'analyse de l'effet de la température du début de forgeage (TdDF), à la fois sur l'aspect physique du bourrelet, le profil de la micro-dureté, les propriétés mécaniques post-soudage. Lors des opérations de soudage, la température est mesurée en deux positions différentes en utilisant deux thermocouples, le premier de type K (avec contact) et le second à infrarouge (sans contact).

Pour toutes nos opérations nous avons utilisé des échantillons de longueur 45 mm et de diamètre 12 mm, découpés directement dans des barres de 6 m. Après l'opération de découpage, les surfaces qui seront mises en contact ont subi une opération de dressage. Au total plus d'une centaine d'opérations avec une dizaine de conditions ont été réalisées.

Nous présentons et nous discutons sur le plan macroscopique et microscopique trois cas, qu'on désigne par X2, X4 et le X5. Chaque cas est présenté est le résultat de 3 à 4 opérations de soudage (tableau 4).

Cas	n [tr/min]	t. d'accostage [s]	P. de friction [MPa]	t. de friction [s]	P. de forgeage [MPa]	t. de forgeage [s]	DL [mm]	T <sub>max</sub> [°C]	TdDF [°C]
X2	3000	3.5	3.50	8.50	8.00	5.00	8.00	790	299
X4			4.00	8.50	8.00		11.75	870	303
X5			4.00	6.50	8.00		8.75	819	357
DL			Diminution de la longueur de la pièce après soudage						
TdDF			Température du début de forgeage						

Tableau 4: Conditions de soudage

## 2.2 Micro-Dureté Hv<sub>0,1</sub>

Le profil de micro-dureté nous a permis dans un premier temps d'avoir une première idée sur l'évolution des propriétés micromécaniques locales, essentiellement autour du centre du joint. Les mesures ont été prises de part et d'autre du centre, le long de l'axe de soudage (figure 2) avec la partie fixe désignée par (+) et la partie mobile désignée par (-).

Les échantillons sont polis mécaniquement jusqu'à 5 microns et les mesures sont effectuées avec un poids de 100g. Pour le matériau de base 7 mesures ont été réalisées à différents endroits, avec une incertitude de 17 unités.

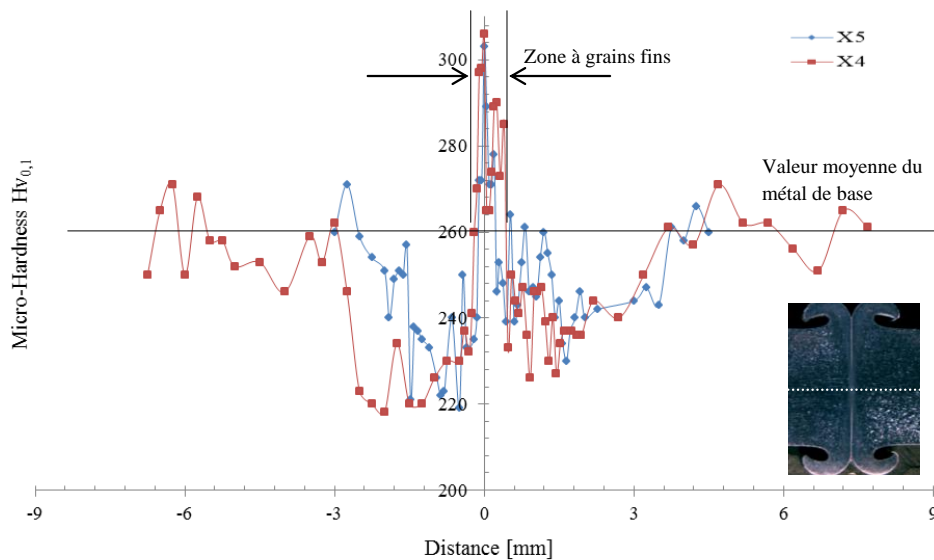


Figure 2 : Profil de la micro-dureté, cas X4 et X5

### 2.3 Essais de traction

Les essais de traction ont été réalisés dans le but de comparer les propriétés mécaniques globales avant et après soudage. Ces essais ont été conduits à  $1.6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  sur une machine de traction universelle de capacité  $\pm 100 \text{ kN}$ . Les éprouvettes testées ont été prélevées dans la direction de soudage. Le déplacement au cours de l'essai a été mesuré en utilisant un capteur d'ouverture  $19.5 \text{ mm} \pm 2.5$ , monté sur l'éprouvette de part et d'autre de l'interface du joint.

### 2.4 Analyse par EDX

Les sept points de mesures pris dans la zone de soudage en allant vers le centre de soudage confirment la bonne répartition des éléments alliés dans le cordon de soudure (figures 3).

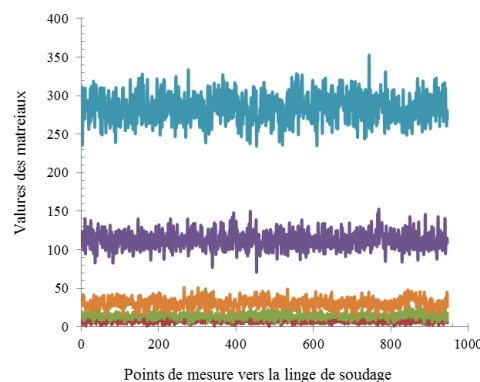


Figure 3 : Analyse par EDX

## 3 Discussion

Au cours d'une opération de soudage par friction directe la microstructure du métal de base passe par *trois états*. Durant la première étape de la phase de friction (1<sup>ère</sup> EPF), la pression de friction, c'est-à-dire l'action mécanique, affecte fortement la microstructure du métal de base, en faisant naître une

Zone Déformée Mécaniquement (ZDM). On estime ici que l'effet de la température est inexistant [11], caractérisé par le profil élevé de la micro-dureté de 40 Hv<sub>0,1</sub> par rapport à la valeur moyenne du métal de base (figure 4).

C'est au cours de la seconde étape de la phase de friction (2<sup>ème</sup> EPF) que l'action de la température est la plus visible sur la microstructure, comme l'atteste toujours les relevés de la micro-dureté (figure 4) ; où cette dernière chute en moyenne à 89 Hv<sub>0,1</sub>, mais cette fois-ci, par rapport à celle de la ZDM. Ceci peut être expliqué par le fait que les grains de part et d'autre de l'interface du joint soudé, affinés lors de l'étape précédente, sont soumis à la fois à la pression et au flux de chaleur. Ce double effet transforme la DMZ en une Zone Déformée Thermo-Mécaniquement (ZDTM). Cette dernière, sous l'effet de pression de friction et la vitesse de rotation, génère de nouveaux grains pour donner naissance au joint. En d'autres termes, c'est durant la phase de forgeage que la future microstructure du joint soudé sera complètement façonnée (figure 4). Elle sera composée essentiellement de grains, appartenant à la ZDTM, se trouvant à la fin de la 2<sup>ème</sup> EPF aux alentours du plan de joint, de taille et de forme différente, qui viennent remplacer ceux se trouvant sur la ligne de l'interface expulsés vers l'extérieur sous l'effet de la pression de forgeage.

Notre analyse nous conforte dans l'idée que par l'application de la pression de forgeage, le grain encore plastique absorbe une partie de l'énergie développée qui va lui permettre à se déplacer vers la circonférence libre de la pièce achevant la formation finale du bourrelet [12 et 13]. Le reste des grains et d'énergie de la ZDTM, respectivement, établiront la future structure du joint ; et donnera naissance à un noyau dur dont la taille des grains dépend à la fois du niveau de température restant à la fin de la 2<sup>ème</sup> étape (TdDF) et de la pression de forgeage (3<sup>ème</sup> phase). L'effet de la température du début de forgeage (TdDF) est très visible sur le profil de la micro-dureté autour du centre ; le X4 présente des valeurs plus élevées que celles du X5 et le noyau qui contient les grains fins est de forme cylindrique, de diamètre (> 0.4 mm) plus grand que celui du X5.

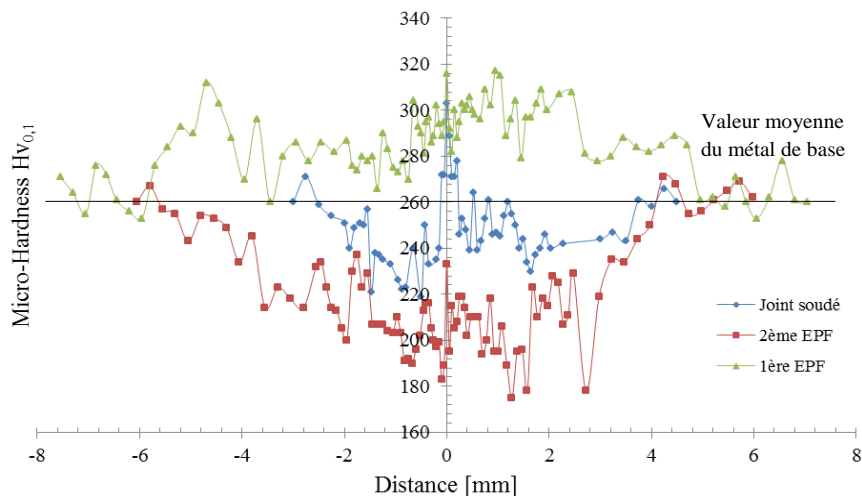


Figure 7 : Profil de la micro-dureté au cours des trois étapes du soudage

Les essais de traction montrent que pour les pièces soudées, la déformation plastique a tendance à se localiser au-delà de l'interface, c'est à dire dans les zones les plus molles affectées thermo-mécaniquement [14] au cours de la 2<sup>ème</sup> EPF. En faisant abstraction sur la dispersion liée à l'essai de traction, on relève des différences entre le métal de base et les échantillons soudés. Ces différences se manifestent essentiellement par une diminution de la déformation plastique homogène (tableau 5) et la quasi inexistence du domaine de la déformation plastique localisée, le cas X5 est le plus proche du métal de base (tableau 5).

Dia. (mm)	Cas	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_{\Delta \sigma_{max}}$ (%)	$\epsilon_{max}$ (%)	$\frac{\sigma_{max, jointe}}{\sigma_{max, métal de base}}$ (%)	$\frac{\epsilon_{\Delta \sigma_{max, jointe}}}{\epsilon_{\Delta \sigma_{max, métal de base}}}$ (%)
6	Métal de base	678.17	0.27	0.46	-	-
	X1	641.21	0.19	0.25	94.55	70.37
	X2	641.34	0.20	0.25	94.55	74.07
	X3	<b>670.13</b>	<b>0.21</b>	0.23	<b>98.81</b>	<b>77.78</b>
8	X1	649.21	0.19	0.24	95.73	70.37
	X2	651.37	0.17	0.24	96.05	62.96
	X3	<b>663.69</b>	<b>0.20</b>	<b>0.26</b>	<b>97.86</b>	<b>74.07</b>
X1_TdDF = 299 °C X2_TdDF = 303 °C X3_TdDF = 357 °C		Température du début de forgeage				

Tableau 5: Effet de la température du début de forgeage sur les propriétés mécaniques de traction

## 4 Conclusion

La première apparition du soudage par friction remonte à 1860, par contre son introduction dans le milieu industriel a été au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle. Depuis cette date, plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce procédé en utilisant différentes analyses afin de relater la genèse et les mécanismes gouvernant le soudage par friction direct.

Par ce travail et par une démarche simple, nous avons essayé d'expliquer les mécanismes gouvernant la microstructure du joint soudé obtenu par soudage par friction direct. On peut conclure que la microstructure finale du joint soudé par friction rotative dépend essentiellement du niveau de la température du début de forgeage, qui est elle-même, fonction du temps de la 2<sup>ème</sup> EPF. En d'autres termes, plus le temps de la 2<sup>ème</sup> EPF est allongé, plus on entame la phase de forgeage avec des niveaux de températures faibles, ce qui favorise simultanément l'affinement du grain fin et l'élargissement de la zone qui les contient. Cette zone peut fragiliser le comportement global en traction de la pièce soudée.

## Références

- [1] Genevois Cecile, Genèse des Microstructures Lors du Soudage par Friction Malaxage d'Alliages d'Aluminium de la Série 2000 & 5000 et Comportement Mécanique Résultant, (2004), Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique "INPG" de Grenoble, France, Spécialité: Science et Génie des matériaux, Ecole Doctorale Matériaux et Génie des Procédés.
- [2] Avinash M., Chaitanya G.V.K., Kumar Giri D., Upadhyya S., and Muralidhara B.K., Microstructure and Mechanical Behaviour of Rotary Friction Welded Titanium Alloys, (2007), World Academy of Science, Engineering and Technology, p.p.146-148, 35.
- [3] Koen Faes, Alfred Dhooge, Patrick De Baets, Paul Afschrift, New Friction Welding Process for Pipeline Girth Welds-Welding Time Optimization, (2009), Int J Adv Manuf Technol, pp. 982–992, 43.
- [4] Bonte D., Derynck B., De Baets P., De Waele W. and Faes K., Friction Welding of Ceramics to Metals, (2010), Day of Research 2010, Ghent University, Laboratory Soete, Belgian Welding Institute, Belgium, p.p. 14-20.
- [4] Rishant and Lalit Kumar. To Review the Friction Welding Joint Brass & Aluminium Using Microstructural Behaviour. International Journal of Electrical, Electronic and Mechanical Fundamentals, Vol. 23, Issue 01, June 2016. pp.10-12.
- [5] Manish Kumar, Balinder Singh, Ashwani Mor. Effect of Process Parameters on Mechanical Behavior and Micro Structure Evolution of Various Dissimilar Stainless Steel and Aluminium Alloys Welded by Friction Welded Joints by Using S.E.M—A Review. International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering, Vol. 5 Issue 7, July-2016, pp. 164-172.

- [6] Deulkar S.S., Sidhu J.S. and Lathkar G.S., Experimental Investigation and Statistical Analysis of Friction Welding Parameters for Joining Dissimilar Materials, Al-63400 Alloy and Fe 410WA, International Journal of Current Engineering and Technology, Special Issue-6 (Oct 2016), pp. 21-26.
- [7] Raji Reddy D., Laxminarayana P., Reddy G.C.M., Reddy G.M.S., Influence of Process Parameters on Hardness and Microstructure of Pre-Heat Treated Friction Welded. 15CDV6 Alloy Steel, International Journal of Mechanical and Production Engineering, Volume- 4, Issue-11, Nov.-2016, pp.13-17.
- [8] Sasidharan B., Narayanan K.P., Arivazhakan R., Influence of Interface Surface Geometries In The Tensile Characteristics of Friction Welded Joints From Aluminium Alloys, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Volume 2, Special Issue 1, December 2013, pp.786-793.
- [9] Jabbar Hassan A., Lechelah R., Boukharouba T., Miroud D., Titouche N. and Ouali N., History of microstructure evolution and its effect on the mechanical behavior during friction welding for AISI 316. 2017, Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering Systems, Edts. T. Boukharouba, G. Pluinage and K. Azouaoui, Springer. Pp. 51-65,
- [10] AK Steel Corporation, 9227 Centre Pointe Drive, West Chester, OH 45069, [www.aksteel.com](http://www.aksteel.com),
- [11] Davis J. R., Heat Resistant Materials, (1997), ASM especially handbook, Printed in the USA, First Edition, p.p.144 – 294,
- [12] Shanjeevi C., Satish Kumar S., Sathiya P., Evaluation of Mechanical and Metallurgical Properties of Dissimilar Materials by Friction Welding, (2013), International Conference on Design and Manufacturing, IConDM, Procedia Engineering, p.p. 1514 – 1523, 64,
- [13] Schmicker D., Persson P.O., Strackeljan J., Implicit Geometry Meshing for the Simulation of Rotary Friction Welding, (2014), Journal of Computational Physics, p.p. 478–489, 270,
- [14] Ajith P.M., Birendra Kumar Barik, Sathiya P., Aravindan S., Multiobjective Optimization of Friction Welding of UNS S32205 Duplex Stainless Steel, (2015), Defence Technology, 157-165, 11