



HAL
open science

Caractérisation micrographique et mécanique des joints soudés par la méthode ATIG

Guillaume Rückert, Bertrand Huneau, Surendar Marya

► **To cite this version:**

Guillaume Rückert, Bertrand Huneau, Surendar Marya. Caractérisation micrographique et mécanique des joints soudés par la méthode ATIG. 17e Congrès Français de Mécanique, AFM, Aug 2005, Troyes, France. pp.1-6. hal-04213012

HAL Id: hal-04213012

<https://hal.science/hal-04213012>

Submitted on 20 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation micrographique et mécanique des joints soudés par la méthode ATIG

Guillaume Rückert, Bertrand Huneau, Surendar Marya

École Centrale Nantes
Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique - UMR CNRS 6183
BP 92101 - 1, rue de la Noë 44321 Nantes Cedex 3
guillaume.ruckert@ec-nantes.fr

Résumé :

L'utilisation de la silice permet d'optimiser les performances du soudage TIG de nombreux alliages. La présente étude est une contribution expérimentale à la caractérisation des joints soudés avec cet oxyde. Cette étude est consacrée à l'observation micrographique de la zone fondue ainsi qu'à la caractérisation mécanique des joints soudés afin de valider la résistance mécanique de l'ensemble.

Abstract :

The use of silica allows to enhance the TIG welding performances for many commercial grades and alloys. The present study is an experimental contribution to the characterization of joints welded with this oxide. This study is devoted to the micrographic observation of the molten zone and then to the mechanical characterization of the welded joints in order to validate the resistance of the welded structure.

Mots-clefs :

Aciers inoxydables austénitiques; Soudage TIG; Flux activants; Silice; Essais mécaniques; Extensométrie optique; Microscopie électronique à balayage (MEB)

1 Introduction

Les aciers inoxydables sont couramment employés dans de nombreux secteurs d'activité tels que l'aéronautique, l'automobile, les industries chimiques et alimentaires pour leurs bonnes propriétés mécaniques ainsi que leur grande résistance à la corrosion. Les ensembles constitués de ces matériaux sont généralement de grandes pièces à géométrie complexe et sont le résultat d'un assemblage de pièces élémentaires réalisé par soudage. Les soudures obtenues doivent être d'excellente qualité, en particulier pour la chimie ou l'alimentaire pour lesquels les tôles soudées sont en contact avec un milieu fluide agressif. Le procédé de soudage à l'arc TIG (Tungsten Inert Gas) permet d'obtenir des cordons de soudure avec une cosmétique très convenable pour un investissement limité. Ces atouts confèrent au procédé TIG une place importante dans les secteurs d'activité précédemment évoqués. Cependant, les épaisseurs soudables en une seule passe par ce procédé sont limitées à 3mm pour une soudure bord à bord. Or, dans de nombreuses applications industrielles, les épaisseurs des pièces soudées sont supérieures à cette valeur. Le procédé TIG devient donc moins compétitif face aux autres procédés d'assemblage.

Dans ce contexte, le procédé ATIG (Activated-TIG) est une solution technologique qui a été développée par l'Institut Paton (Ukraine) [1] et qui permet d'augmenter le potentiel de pénétration tout en conservant un matériel standard. Il s'agit d'ajouter un dépôt de sels minéraux dits "flux activants" en surface des tôles à assembler avant l'opération de soudage. La contribution de ces flux activants est décomposée en deux actions distinctes (Figure 1); d'une part, une

constriction de l'arc électrique par les ions négatifs provenant de la dissociation des éléments du flux [2] et, d'autre part, un effet tensioactif des éléments dissociés dans le bain de fusion qui contractent la largeur du bain de fusion au dépend d'une forte augmentation de la pénétration [3, 4]. Cette technique est appliquée aux aciers inoxydables et différentes formulations ont été développées afin d'optimiser la pénétration des joints soudés tout en garantissant un aspect de surface non dégradé [5]. Parmi les éléments sélectionnés dans la formulation de ces mélanges complexes, la silice (SiO_2) est employée majoritairement. En effet, son apport favorise grandement l'augmentation de pénétration du joint soudé [6] (Figure 2 (b)) par rapport au procédé TIG (Figure 2 (a)).

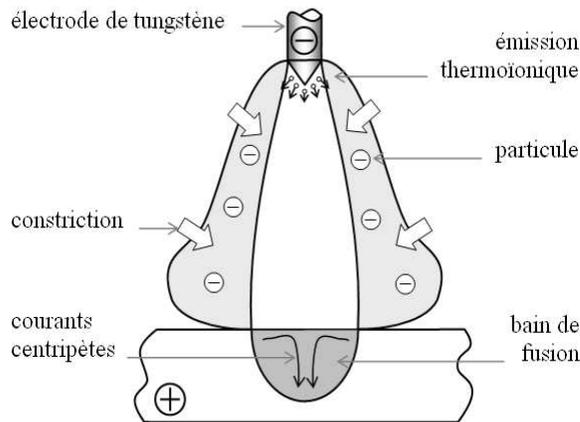


FIG. 1 – Schéma de principe de l'action du flux activant dans l'arc électrique et dans le bain de fusion

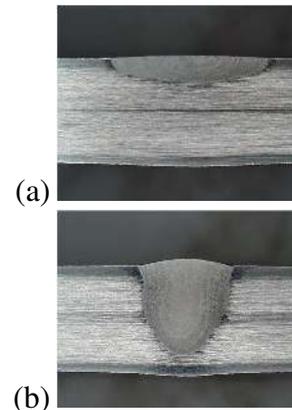


FIG. 2 – Coupes transversales de lignes de fusion réalisées à partir des procédés TIG (a) et ATIG avec SiO_2 (b) pour un acier inoxydable 304L

La présente étude est une contribution au développement de l'application de la silice au soudage TIG des aciers inoxydables. Ce travail expérimental a pour objectif de mettre en évidence les modifications à l'échelle micrographique provoquées par la présence de silice ainsi que leur effet sur les propriétés mécaniques du joint soudé.

2 Expérimentation

Des lignes de fusion sont réalisées sur des tôles d'acier inoxydable austénitique *AISI 304L* d'épaisseur $6mm$, à l'aide d'un poste de soudage TIG automatique. L'énergie incidente de soudage est optimisée de manière à obtenir des cordons fortement pénétrés. Le surfacage qui suit a pour but de conserver une section centrale totalement fondue sur une épaisseur de $3mm$ mais également d'éliminer les défauts géométriques en surface qui peuvent être le lieu de concentrations de contraintes occasionnant une rupture prématurée. Sur ces plaques surfacées, des éprouvettes sont usinées perpendiculairement à la ligne de fusion.

Les éprouvettes sont ensuite sollicitées en traction uniaxiale quasi-statique ($10^{-2}s^{-1}$). La mesure des déformations est effectuée à partir d'un équipement d'extensométrie optique composé d'une caméra rapide *FastCam* et du logiciel de corrélation d'images *Vic2D*. Cette technique offre la possibilité de localiser les champs de déformation dans un domaine restreint

de l'éprouvette. En particulier en ce qui concerne les joints soudés, la zone fondue (ZF) ainsi que la zone affectée thermiquement (ZAT) peuvent être caractérisées par cette méthode. Ces deux zones sont localisées visuellement grâce à une attaque électrolytique légère réalisée sur la tranche de l'éprouvette.

La microscopie optique à balayage (MEB) est employée, dans un premier temps, pour mettre en évidence la présence d'inclusions dans la zone fondue des coupes transversales. Pour éviter un éventuel déchaussement des inclusions, aucune attaque chimique n'est réalisée sur les surfaces étudiées. Dans un second temps, les faciès de rupture des éprouvettes de traction sont étudiés au MEB. Une étude complémentaire d'analyse EDSX (Energy Dispersive Spectrometry of X-rays) est menée, dans les deux cas, pour caractériser la nature des éléments constituant les inclusions.

3 Caractérisation des joints soudés

3.1 Observation de la zone fondue

La visualisation au MEB des sections fondues révèle un cordon TIG exempt de défaut ou d'inclusion. Il en est de même pour le métal de base. Par contre, l'utilisation d'éléments extérieur en procédé ATIG conduit à une section fondue contenant des inclusions sphériques représentées par les tâches sombres de la figure 3. La répartition de ces inclusions est homogène dans la section fondue. Ce constat a posteriori conforte l'hypothèse d'un brassage important dans le bain de fusion dominé par les courants de Marangoni [7]. Le taux moyen des inclusions dans le bain vaut environ 3400 particules $/mm^2$. La taille de ces inclusions varie entre 1 et $2\mu m$.

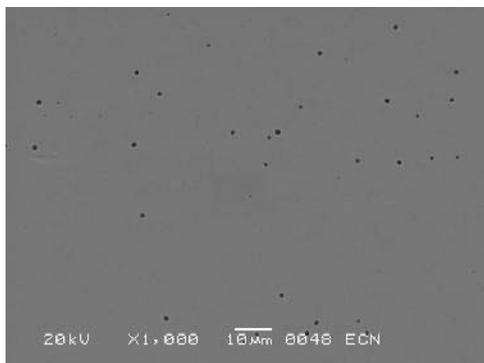


FIG. 3 – Cliché MEB (x1000) de la section fondue pour le procédé ATIG

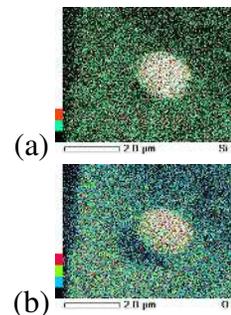


FIG. 4 – Analyse chimique d'une inclusion - Cartographie EDSX dans la section fondue du silicium (a) et de l'oxygène (b)

En complément, l'analyse EDSX permet d'identifier la nature des inclusions qui occupent la section fondue obtenue en procédé ATIG. Cette analyse révèle la présence de trois éléments (Figure 4) ; l'oxygène (O), le silicium (Si) ainsi que le manganèse (Mn). Les deux premiers éléments sont ceux qui constituent le flux activant (SiO_2), le second et le troisième sont présents en faible quantité dans le métal de base ($m_{Si} = 0,32\%$ et $m_{Mn} = 1,79\%$ d'après le certificat du lot). Le taux d'oxygène est délicat à définir avec l'EDSX du fait de sa faible masse molaire. Il est seulement possible d'établir un taux massique entre le silicium et le manganèse dans la région de l'inclusion : $m_{Si}/m_{Mn}(ATIG) \approx 3/4$. Ce taux local est bien supérieur à la moyenne

volumique dans la zone fondue. Cet écart peut être expliqué par l'apport extérieur de silicium provenant du flux activant.

La combinaison de l'oxygène et du silicium avec le manganèse confirme que ces deux éléments ont été introduits dans le bain sous forme dissociée. L'oxygène qui est un élément tensioactif du fer [4] devient un élément moteur à l'origine des courants de Marangoni centripètes favorisant la pénétration. Au cours du refroidissement, l'oxygène se recombine finalement sous forme d'oxyde avec le silicium et le manganèse.

Bien que les inclusions identifiées dans le cordon ATIG soient de petites tailles, leur présence en grand nombre suffit à s'interroger quant au comportement mécanique de l'ensemble mécano-soudé. La partie suivante fournit un premier élément de réponse pour un essai de traction quasi-statique.

3.2 Essais de traction

La figure 5 présente les courbes de traction conventionnelle pour trois zones homogènes ; le métal de base (MB) qui constitue l'éprouvette de référence, la zone fondue du cordon TIG et la zone fondue du cordon ATIG. La limite d'élasticité (ou résistance pratique à 0,2% de déformation : $R_{e0,2}$) et la résistance mécanique (R_m) des trois zones sont déterminées à partir de ces courbes et sont reportées dans le tableau 1. De plus, pour les deux joints soudés, les valeurs caractéristiques de la zone affectée thermiquement sont indiquées en complément. Les ruptures des joints soudés ayant systématiquement lieu dans la zone fondue, le comportement des ZAT respectives est décrit partiellement jusqu'à la résistance mécanique de la zone fondue. La figure 6 illustre une localisation des déformations dans la zone fondue pour une contrainte proche de la résistance mécanique.

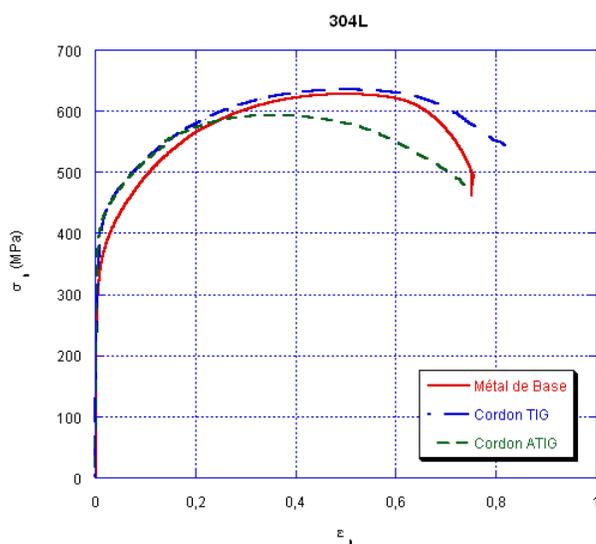


FIG. 5 – Courbes de traction conventionnelles du métal de base (MB), de la zone fondue du cordon TIG et de la zone fondue du cordon ATIG

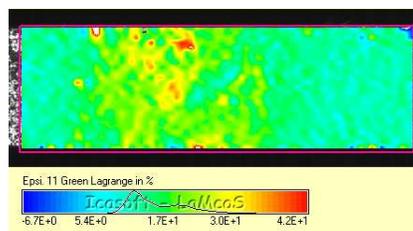


FIG. 6 – Champs des déformations longitudinales dans une éprouvette soudée par le procédé ATIG

Quel que soit le procédé de soudage (TIG ou ATIG), la limite d'élasticité de la zone fondue et de la zone affectée thermiquement du cordon réalisé est augmentée d'environ $60MPa$ par rapport au métal de base. En effet, les modifications métallurgiques induites par le cycle thermique de soudage transforment une structure initiale totalement austénitique en une structure austéno-ferritique. La phase ferritique augmente par sa présence la limite d'élasticité de l'acier inoxydable. Pour le procédé ATIG, l'ajout de silice conduisant à la formation d'inclusions dans la zone fondue n'induit pas de modification de $Re_{0,2}$. Les ensembles mécano-soudés sont, dans un premier temps, dimensionnés en statique à partir de cette valeur. On peut donc dire que le procédé ATIG permet une multiplication par trois des épaisseurs soudables par rapport au procédé TIG, sans diminuer la limite d'élasticité.

	MB	ZF (TIG)	ZAT (TIG)	ZF (ATIG)	ZAT (ATIG)
$Re_{0,2}(MPa)$	284	344	344	339	335
$R_m(MPa)$	628	635	> 635	585	> 585

TAB. 1 – Limite d'élasticité et résistance mécanique des différents domaines d'un joint soudé réalisé sur un acier inoxydable 304L

Par contre, la résistance mécanique " R_m " des zones fondues varie selon le procédé. En effet, la valeur de cette résistance chute de $50MPa$, soit environ 8% pour le procédé ATIG, comparativement au procédé TIG. L'étude suivante des faciès de rupture est menée dans le but d'apporter des éléments de réponse à cette baisse pour le procédé ATIG.

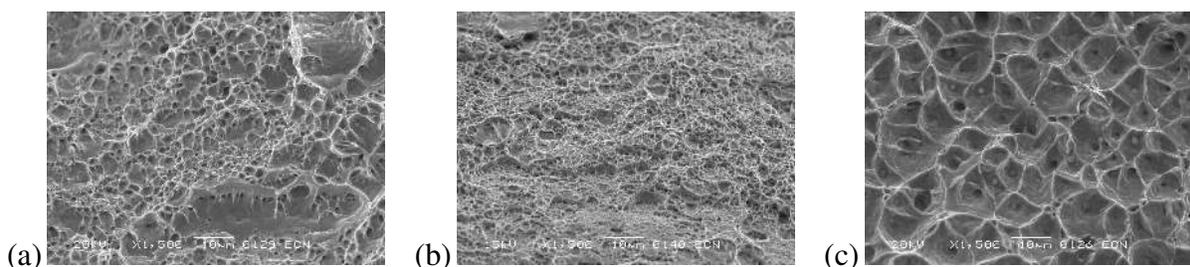


FIG. 7 – Clichés MEB (x1500) des faciès de rupture pour (a) Métal de Base , (b) Cordon TIG et (c) Cordon ATIG

Les clichés MEB de la figure 7 représentent les faciès de rupture respectifs du métal de base, du cordon TIG et du cordon ATIG. Pour la rupture ductile des matériaux métalliques, une cavitation apparaît généralement à partir de défauts de taille cristallographique. La croissance puis la coalescence de ces cavités aboutissent à un faciès de rupture dit "à cupules". Pour les trois cas de l'étude, la présence de cupules suppose donc une rupture ductile du matériau. La taille de ces cupules est cependant variable selon la zone dans laquelle la rupture survient. En particulier, pour le cordon ATIG, les cupules sont de 5 à 10 fois plus grandes que dans les deux autres cas. De plus, les inclusions identifiées sur les coupes transversales sont retrouvées au fond d'une majorité de cupules. Lors de l'endommagement, les inclusions présentes dans la zone fondue ATIG provoquent une cavitation à un stade précoce de la plastification du métal. Les contraintes correspondantes à cette décohésion sont donc inférieures à celles occasionnées par des défauts de plus petite taille. L'accélération du mécanisme de la rupture ductile permet d'expliquer la baisse de la résistance mécanique dans la section fondue du procédé ATIG par rapport au procédé TIG.

4 Conclusions

Le procédé ATIG est une alternative du procédé TIG qui optimise les performances de celui-ci sans changement de matériel. En l'occurrence, le seul ajout de silice sur les tôles à assembler augmente fortement la pénétration. Cependant de nombreuses inclusions sont identifiées dans la zone fondue avec cette technique. Les éléments constituant ces inclusions proviennent pour une grande partie des éléments dissociés du flux activant. Pour autant, ces modifications chimiques du joint soudé n'entraînent pas de chute de la limite d'élasticité qui constitue le critère de dimensionnement en statique d'un ensemble mécano-soudé. Par contre, la présence d'inclusion conduit à une rupture ductile prématurée de la zone fondue. La résistance mécanique baisse d'environ 50MPa entre les procédés TIG et ATIG.

Pour compléter ces travaux récents, une étude en fatigue des joints soudés semble importante afin d'illustrer l'influence des inclusions sur la limite d'endurance de ces joints.

5 Remerciements

Les essais de traction ont été réalisés au Centre de Ressources en Essais Dynamiques (CRED) de l'institut GeM. Les auteurs souhaitent associer MM. Pierrick Guegan et Franck Pasco à la réalisation de ces travaux.

Les auteurs tiennent également à remercier M. Robert Maillard pour son aide technique en microscopie électronique à balayage.

Références

- [1] B.E. Paton, V.N. Zamkov, and Priloutsky V.P. Le soudage a-tig du titane et de ses alliages. *Soudage et techniques connexes*, pages 23–26, November 1998.
- [2] A.G. Simonik. Effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of electro-negative elements. *Svar. Proiz.*, (3) :68–71, 1976.
- [3] C.R. Heiple and J.R. Roper. Mechanism for minor element effect on gta fusion zone geometry. *Welding Journal, Welding Research Supplement*, pages 97–102, April 1982.
- [4] J. Lowke, M. Tanaka, and M. Ushio. Insulation effects of flux layer in producing greater weld depth. In *IIW Commission XII Workshop, DocXII-1800-04*, Osaka, Japan, July 2004.
- [5] N. Perry. Soudage atig, évolution des réalisations mécano soudées de fortes épaisseurs. In *14ème Congrès Français de Mécanique*. AFM, September 1999.
- [6] P. Modenesi, E. Apolinario, and I. Pereira. Tig welding with single-component fluxes. *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1) :260–265, March 2000.
- [7] S.K. Marya and D.L. Olson. Effect of minor elements and process parameters on gta weld bead variances in steels. *Mémoires et Etudes Scientifiques - Revue de Métallurgie*, pages 25–34, January 1989.