

Sources d'hétérogénéité d'un assemblage par soudage par diffusion homogène de tôles en acier austénitique inoxydable

Heterogeneity sources during homogeneous HIP-bonding of austenitic stainless steel

Nicolas Bouquet^{1,a}, Emmanuel Rigal¹, Sebastien Chomette¹, Olivier Heintz²
et Frédéric Bernard²

¹ CEA Grenoble, LITEN/LCTA, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble, France

² Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS, Université de Bourgogne, 9 Av. Alain Savary, BP. 47870, 21078 Dijon, France

Abstract. This document deals with the structural sources of heterogeneity during homogeneous HIP-bonding of austenitic stainless steel. An homogeneous microstructure was finally obtained with very good mechanical properties comparable to those of the base material. To conclude, a way to further improve the assembly properties is discussed.

Résumé. Ce document présente un aperçu des hétérogénéités de microstructure aux interfaces qui peuvent être rencontrées lors du soudage par diffusion homogène d'un assemblage de tôles. Un assemblage homogène a finalement été réalisé avec l'obtention de propriétés mécaniques très satisfaisantes. Pour finir, une piste de réflexion est apportée afin d'améliorer les propriétés des assemblages.

INTRODUCTION

Le soudage par diffusion par Compaction Isostatique à Chaud (CIC) de tôles millimétriques rainurées est une technique prometteuse pour la fabrication d'échangeur de chaleur compact [1]. Le soudage par diffusion est un assemblage à l'état solide qui a l'avantage, par rapport aux autres techniques de soudage (brasage, FSW) de permettre la réalisation de pièces de grandes dimensions et de ne pas présenter de fusion locale. Ce dernier point est obtenu grâce à l'effet conjugué de la pression et de la température, environ 0,5 à 0,8 fois la température de fusion du matériau. La Figure 1 schématise les mécanismes de soudage par diffusion d'un assemblage de tôles homogènes avec la distinction de deux stades :

- Déformation plastique localisée au niveau des aspérités Figure 1(a),
- Puis résorption lente des cavités isolées par diffusion, Figure 1(b). Cette étape est accompagnée par une croissance des grains du matériau permettant un franchissement généralisé de l'interface par les joints de grains, Figure 1(c).

Ce procédé permet la fabrication d'assemblage homogène (sans zone thermiquement affectée puisque c'est l'ensemble de la pièce qui est traitée thermiquement) à condition que la préparation de chaque surface (rugosité, décapage, dégraissage ...) et le cycle CIC (température, pression, temps de palier) soient maîtrisés.

Ce travail a pour but de présenter les différentes sources d'hétérogénéités qui peuvent être observées lors du soudage par diffusion par CIC d'un assemblage de tôles.

^a e-mail: nicolas.bouquet2@cea.fr

L'étude a été menée sur des tôles en acier inoxydable d'épaisseur 3 mm en acier 1,4404 (316L) et 1,4571 (316Ti).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les observations microscopiques des interfaces sont présentées sur la Figure 2. La flèche blanche correspond à la position d'une interface. Des essais de résilience ont été réalisés afin de déterminer la nocivité de l'hétérogénéité des interfaces. L'entaille des éprouvettes a été positionnée au niveau d'une interface.

Les sources d'hétérogénéités d'une interface lors d'un assemblage par CIC sont multiples et interviennent à différents stades du procédé de fabrication. En amont du procédé, le choix de la nuance d'acier doit être fait selon son critère de soudabilité. Une nuance avec du titane, élément oxydable, comme dans le 316Ti bloque le franchissement de l'interface par les joints de grains par migration du titane en surface, Figure 2(a). La propreté des surfaces à assembler est un autre critère important afin d'obtenir une interface de qualité satisfaisante, Figure 2(b). La présence de particules de sablage (alumine) sur les surfaces à assembler a bloqué les joints de grains et limité le franchissement.

Les paramètres expérimentaux du procédé de fabrication sont également une source importante d'hétérogénéité de microstructure des interfaces. Des pores résiduels peuvent perdurer lorsque la pression d'assemblage est trop faible (100 bar), Figure 2(c). De plus, l'acier 316L a la particularité de présenter un domaine de croissance anormale des grains. La croissance anormale est une croissance soudaine et rapide d'une minorité

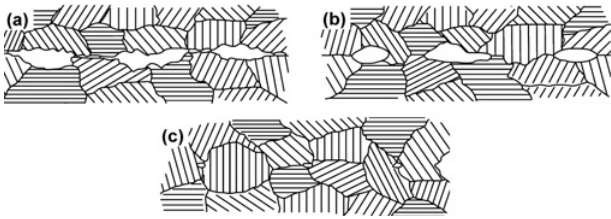


Figure 1. Représentation schématique des différents stades du soudage par diffusion homogène d'un assemblage [2].

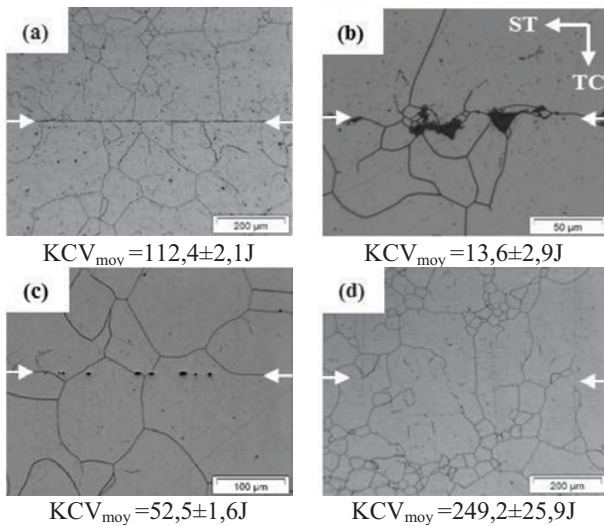


Figure 2. Mise en évidence des sources d'hétérogénéités d'un assemblage par soudage par diffusion et l'influence sur la tenue à la résilience (moy. sur 8 essais).

de grains au détriment de leurs voisins. Un cycle de CIC dans ce domaine de température entraîne une forte hétérogénéité de microstructure entre l'interface ($D_{\text{moy}} = 70,3 \pm 2,9 \mu\text{m}$) et le cœur ($D_{\text{moy}} = 37,7 \pm 3,8 \mu\text{m}$) de la tôle. L'interface est notamment caractérisée par la présence de gros grains ($D > 300 \mu\text{m}$) et de petits grains ($D = 40 \mu\text{m}$). Pour ces aciers, qui sont peu sensibles à l'effet d'entaille par rapport à des aciers ferritiques, la nocivité des hétérogénéités des interfaces peut être classée comme suit dans le cadre de notre étude :

- Présence d'inclusions non métalliques,
- Présence de pores résiduels,
- Absence de franchissement associé à une précipitation interfaciale,
- Hétérogénéité de taille de grains.

Les deux premiers points cités peuvent être intervertis selon la taille et le nombre des défauts. Connaissant ces critères, un dernier assemblage a été fabriqué. Une microstructure homogène a été obtenue avec un franchissement généralisé des joints de grains à travers l'interface [3]. Le diamètre moyen des grains et l'aire de croissance anormale sont $92,1 \pm 2,3 \mu\text{m}$ et $5,7 \pm 1,6 \%$ respectivement. Un grain est considéré anormal lorsque son diamètre est supérieur à trois fois le diamètre moyen des grains. Aucune trace résiduelle de « l'interface initiale » n'a été observée sur les métallographies.

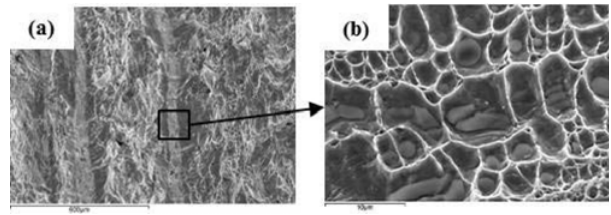


Figure 3. Présences d'alignement de précipités non métalliques sur le faciès de rupture des éprouvettes de résilience.

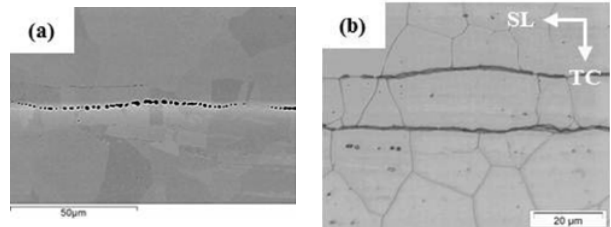


Figure 4. Hétérogénéité dans la tôle de 316L à l'état de réception : précipités non métalliques (a) et ferrite δ (b).

Les essais de résilience sont très satisfaisants avec une valeur moyenne supérieure à $283,8 \pm 29,3 \text{ J}$. 4 éprouvettes sur 8 ont atteint la capacité maximum du mouton pendule (300J) et la valeur retenue est donc une valeur par défaut. L'observation des faciès de rupture au Microscope Electronique à Balayage (MEB) montre une rupture fortement ductile avec la présence importante d'inclusions non métalliques, Figure 3. Les particules allongées sont des aluminosilicates et les petites particules sphériques sont des sulfures de manganèse avec des traces de cuivre. Ces inclusions sont alignées selon le sens de laminage et sont principalement localisées en fond d'ouverture, Figure 3 (a). Ces inclusions sont fréquemment observées dans les aciers fortement corroyés et elles sont présentes dès l'état de réception des tôles, Figure 4(a). Après assemblage par CIC, ces inclusions sont observées dans toute l'épaisseur de la tôle ainsi que proche de l'interface. La structure de l'assemblage est donc fragilisée par la présence en grand nombre des inclusions et de leurs alignements.

C'est la présence de ces inclusions proches de l'interface qui devient finalement le point faible de la structure par rapport à la jonction. Afin d'améliorer les propriétés mécaniques des assemblages il faut donc établir un critère d'homogénéité des tôles à approvisionner. L'épaisseur des tôles est en plus caractérisée par la présence importante de ferrite δ au niveau des joints de grains, Figure 4(b). La ferrite δ est formée, comme les inclusions, lors de la solidification de l'acier mais celle-ci a totalement été dissoute lors du traitement de CIC. Une température d'assemblage et un temps de palier non adaptés peuvent cependant fragiliser l'assemblage par une dissolution incomplète de la ferrite δ et en créant une hétérogénéité de taille de grains par ancrage des joints de grains.

CONCLUSION

Lors d'un assemblage par soudage par diffusion les sources d'hétérogénéités des interfaces sont nombreuses

et interviennent à tous les stades du procédé de fabrication (nuance, propreté des surfaces, cycle de CIC). En maîtrisant tous ces paramètres, un assemblage homogène a finalement été obtenu. Afin d'améliorer les propriétés des assemblages, l'hétérogénéité des tôles de départ doit également être prise en compte afin que cela ne devienne pas le point faible de la structure.

Références

- [1] Q. Li, G. Flamant, X. Yuan et al., *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2011, 4855–4875.
- [2] Y. Bienvenu, *Assemblage par diffusion (soudage ou brasage)*, *Techniques de l'Ingénieur M747*, 2010, p11.
- [3] N. Bouquet, E. Rigal, F. Bernard et al., *Proceeding LÖT 2013 DVS-Berichte 293*, 2013, 118–122