

SOUDAGE INNOVATEUR DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

PROJET DE RECHERCHE COLLECTIVE IBS EN COLLABORATION AVEC L'UCL-PRM ET LE LASERCENTRUM VLAANDEREN (VITO)

Le projet ALUWELD I a pris fin au début 2006. Ce projet de recherche collective étalé sur deux ans a été subsidié par l'IWTVlaanderen. ALUWELD I avait pour objet l'application de deux procédés de soudage innovateurs sur les alliages d'aluminium: le Friction Stir Welding (friction malaxage) et l'Hybrid Laser Welding (soudage hybride arc/laser). Le projet a réuni une quarantaine d'entreprises et centres de recherche principalement situés en Flandre. On peut dire que de bons résultats ont été enregistrés, durant ces deux années, avec les deux procédés de soudage.

 Par Ir. W. Van Haver, Centre de Recherche de l'IBS
(Traduction: M.C. Ritzen - IBS-BIL)

Introduction et situation du projet

Le soudage des alliages d'aluminium à résistance élevée est généralement une opération délicate en raison de la dégradation des propriétés mécaniques dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et de la présence de porosités dans le métal fondu. De plus, certains de ces alliages d'aluminium sont connus comme étant "non soudables". Les procédés de soudage Friction Stir Welding (FSW ou friction malaxage) et Hybrid Laser Welding (HLW ou soudage hybride arc/laser) peuvent offrir une solution pour l'assemblage plus rapide, sans défauts et donc plus économique de ces alliages avec, en plus, moins de déformations. Friction stir welding est un procédé où l'assemblage se fait à chaque moment à l'état solide. Un outil rotatif (**figure 1**) constitué d'un pion profilé et d'un épaulement profilé ou non est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder. Par friction, le matériau est échauffé jusqu'à des températures où il arrive à un état " pâteux". Lorsque l'outil avance, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion pour former le joint soudé. FSW est réalisé, dans ce projet, par l'UCL-PRM sur une fraiseuse spécialement adaptée. Hybrid laser welding est une

combinaison du soudage au laser et du soudage à l'arc où ces procédés interviennent en même temps sur le même bain de fusion. La vitesse et la productivité du laser sont combinées à la robustesse du procédé de soudage à l'arc. Pour ce projet, le HLW est réalisé par le Lasercentrum Vlaanderen (VITO) où un laser Nd:YAG et une source MIG pulsé sont combinés dans une tête de soudage hybride Fronius (**figure 2**).

Le coût d'investissement pour les deux procédés de soudage est assez élevé et la connaissance pratique est en grande partie aux mains d'entreprises étrangères souvent très grandes (comme Boeing, Airbus, Volkswagen, Audi...) qui ont dépensé beaucoup d'argent en recherche propre et en développement. Il est évident qu'une recherche en Belgique était nécessaire – et continue à rester nécessaire – afin d'introduire ces procédés de soudage au sein des entreprises métalliques belges, afin de maintenir une position concurrentielle égale vis-à-vis des pays voisins.

Ces deux ans de recherche ont permis d'acquérir une très bonne expérience dans le domaine du HLW et du FSW.

Développement du projet

Le projet ALUWELD I est subdivisé en 9 actions (A). Le contenu de

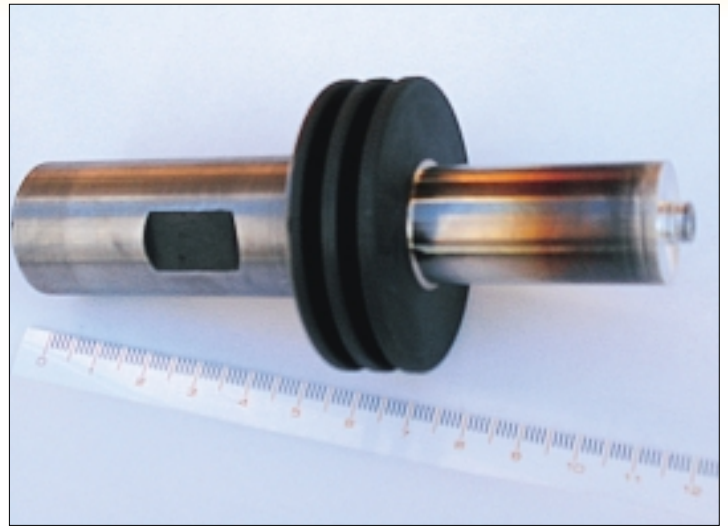
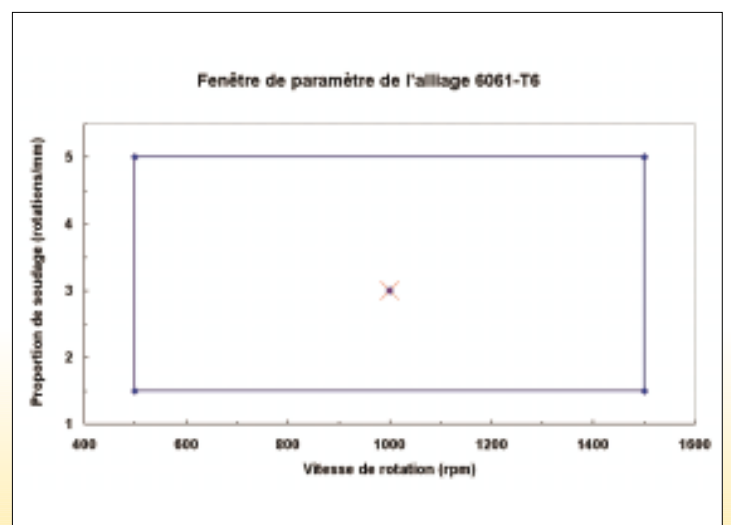


Figure 1: Outil typique utilisé à l'UCL-PRM pour la partie FSW d'ALUWELD I



Figure 2: HLW au Lasercentrum Vlaanderen (VITO): les tôles d'aluminium sont assemblées au moyen d'une tête de soudage hybride Fronius

Figure 3: Fenêtre de paramètres de soudage FSW mise au point pour l'alliage 6061-T6. La croix rouge indique les paramètres de soudage finalement choisis



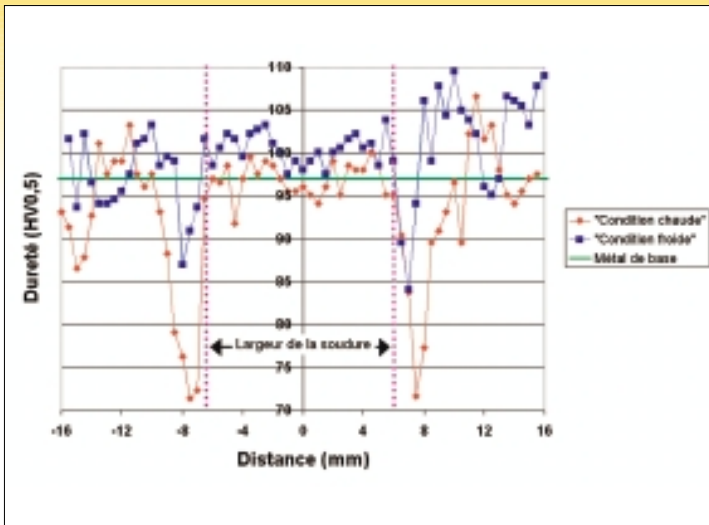


Figure 4: Profils de microduretés mesurées sur 0,3 mm sous la surface de la soudure pour deux soudures friction stir dans le matériau 6056-T4. La soudure "la plus froide" avait un facteur de soudage égal à 1,01 et un prolongement de 9,9% tandis que la soudure "la plus chaude" avait un facteur de soudage de 0,85 et un prolongement de 4,5%

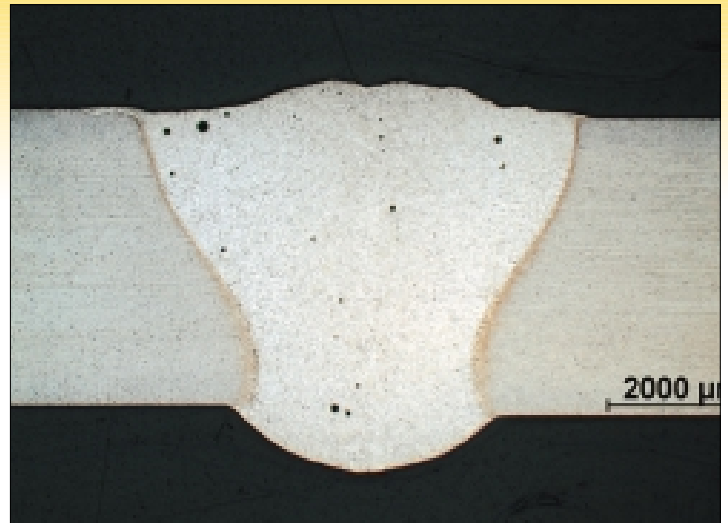


Figure 5: Macrographie d'une soudure hybride dans le 6082-T6. Les porosités sont nettement faibles. La vitesse de soudage est de 2,4 m/min et on a utilisé un métal d'apport 4043

ces actions et une sélection des résultats les plus intéressants sont brièvement présentés ci-après.

Action 1

Choix des matériaux et étude bibliographique (A1)

Sur base des souhaits des partenaires industriels, huit alliages d'aluminium ont été assemblés avec les procédés FSW et/ou HLW, en l'occurrence 2024-T3, 5754-O, 5182-H111, 5083-H111, 6056-T4, 6061-T6, 6082-T6 et l'alliage coulé à haute pression EN AC-46000. Cette première action s'est conclue par une étude bibliographique sur les alliages choisis et un état des techniques FSW et HLW en mettant l'accent sur les combinaisons d'épaisseur de matériaux à assembler.

Actions 2 et 3

Connaissance de base du FSW et HLW (A2) et optimisation (A3)

Des matrices des paramètres opérationnels (vitesse de rotation et rapport de soudage = vitesse

de rotation/vitesse de soudage) pour sept alliages ont été établies pour le friction stir welding. Les soudures à partir de ces matrices ont été soumises, à l'IBS, à des essais de traction, des essais de flexion, des examens métallographiques et des mesures de microdureté. Un exemple d'une telle matrice est donné à la **figure 3**.

Sur base de cette recherche, les paramètres de soudage optimaux ont été choisis. Le critère de choix est d'abord l'absence de défauts qui peuvent typiquement apparaître lors du FSW avec des paramètres de soudage incorrects, comme des défauts en chapelets et des défauts à la racine. Ces défauts peuvent être simplement détectés par métallographie et ont pratiquement toujours une influence négative sur les propriétés mécaniques de l'assemblage.

En deuxième instance, une vitesse de soudage élevée est recherchée

où on peut encore se permettre un faible écart des paramètres de soudage de sorte que la reproductibilité des propriétés ne soit pas compromise.

Ceci vaut certainement pour les alliages d'Al non durcissables à chaud (par ex. la série 5xxx) car on veut une productivité aussi élevée que possible.

Dans le cas d'alliages durcissables à chaud, il y a encore une raison importante: une vitesse de soudage plus élevée donne un adoucissement moindre dans la zone affectée thermiquement, avec pour conséquence une résistance plus élevée et une meilleure déformabilité (on évite ainsi localement des zones trop adoucies).

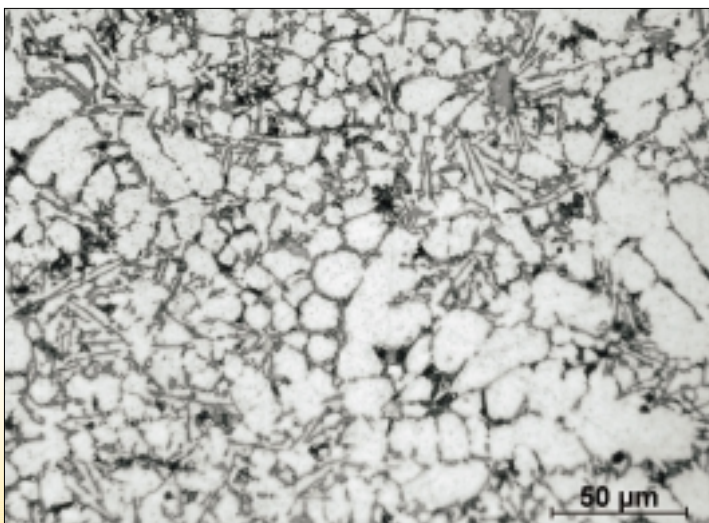
Ceci est illustré à la **figure 4** avec des profils de microduretés mesurées dans deux soudures friction stir dans l'alliage 6056-T4. Une soudure a été réalisée avec un apport calorifique élevé (vitesse de soudage 200 mm/min à

1000 rpm; soudure "la plus chaude"), l'autre avec un apport calorifique plus faible (vitesse de soudage 500 mm/min à 1500 rpm; soudure "la plus froide"). La soudure à faible apport calorifique a la préférence.

La procédure d'optimisation a été effectuée pour le soudage hybride de 7 alliages d'aluminium différents. De la recherche réalisée en 2004, il est ressorti que l'Ar pur avait la préférence comme gaz de protection.

Pour les différents alliages d'épaisseurs comprises entre 1,5 mm et 8 mm, on a obtenu des soudures de bonne qualité pour des vitesses de soudage supérieures à 1 mm/min. Différents métaux d'apport (5183, 4043 et 4047) ont été utilisés. Le choix du métal d'apport optimal s'est basé sur la bonne qualité de la soudure (quantifiée par la teneur en porosités et les propriétés mécaniques) en combinaison avec une vitesse de soudage élevée. Un

Figure 6: Micrographies du métal de base EN AC-46000-F (à gauche) et du centre du "nugget" (à droite). La structure dendritique du métal de base a complètement disparu dans le "nugget"



exemple d'une coupe métallographique d'une soudure hybride est donné à la **figure 5**. Lors de la détermination des propriétés mécaniques des soudures réalisées avec les paramètres de soudage optimaux, il est apparu que les exigences de soudage de l'EN ISO 15614-2 pouvaient largement être atteintes.

Action 4

Caractérisation des soudures (A4)

Cette caractérisation des soudures avec paramètres de soudage optimaux a été réalisée par l'IBS. La caractérisation "normale", sous forme d'essais de traction, essais de pliage (normaux et contre-pliage sur 180°), métallographie et mesures de duretés, a permis de déterminer les paramètres de soudage optimaux pour les différents alliages de A3.

L'affinement de la microstructure qu'on peut obtenir à l'aide du friction stir welding, est remarquable. Dans la **figure 6**, la microstructure du métal de base EN AC-46000-F a été comparée à celle de la partie centrale de la soudure friction stir (appelée "nugget").

De plus, des essais de corrosion intercrystalline ont été réalisés sur le 6061-T6 (métal de base, soudures friction stir et hybrides) et le 2024-T3 (métal de base et soudures friction stir). La zone affectée thermiquement des soudures friction stir était particulièrement sensible à la corrosion intercrystalline et au pitting.

De plus, des essais de fatigue ont été réalisés tant sur les soudures friction stir que les soudures

hybrides dans les alliages 5083-H111 et 6056-T78 (voir A6). Les soudures friction stir présentaient nettement de meilleures propriétés en fatigue. Ceci était principalement dû au fait qu'aucune fissure initiateur de porosité n'apparaissait dans la microstructure au contraire des soudures hybrides.

Action 5

Comparaison des procédés de soudage – Analyse des coûts (A5)

Cette recherche a montré que, avec l'équipement actuellement disponible chez UCL et VITO, la productivité du soudage hybride est nettement plus élevée (supérieure à 1 m/min) – voir la **table**.

Il faut cependant noter que la productivité du procédé FSW peut être nettement améliorée en utilisant d'autres outils ou en augmentant la pénétration de l'outil. De plus, la résistance et la déformabilité des soudures friction stir dans les alliages Al durcissables à chaud sont plus élevées que les soudures HLW. En collaboration avec certaines entreprises de la commission d'utilisateurs, un modèle a été mis au point pour pouvoir calculer le coût par mètre soudé pour le FSW et le HLW.

Action 6

Influence des traitements thermiques après soudage (A6)

Dans A3, des soudures optimisées en 6056-T4 ont été réalisées avec le FSW et le HLW. Dans la pratique normale, cet alliage est soumis, après soudage

et déformation, à un traitement T78. De cette façon, on obtient la résistance à la corrosion la plus élevée, ainsi qu'une grande résistance mécanique.

Dans le cas des soudures friction stir, ce traitement n'apporte aucun gain de résistance tandis que la résistance à la traction transversale dans les soudures au laser a augmenté de 35 MPa par rapport à celle du matériau à l'état soudé. Dans les deux cas, on a constaté une chute drastique de l'allongement. Les soudures traitées thermiquement T78 ont été soumises à des essais de fatigue.

Action 7

Modélisation du FSW (A7)

Des tests FSW réalisés par l'UCL-PRM sur le 2024-T3 ont permis à CENAERO d'appliquer ses modèles sur le FSW de cet alliage.

Action 8

Prestation de service et stimulation à l'innovation (A8)

La stimulation à l'innovation a principalement été faite par l'IBS et le VITO qui ont une large expérience dans les prestations de service. De plus, le 27 octobre 2005, une après-midi d'étude a été organisée par les partenaires de la recherche sur le soudage innovateur des alliages métalliques légers. Cette après-midi est décrite dans le numéro de février 2006 de Métallerie.

Action 9

Management du projet et rapport (A9)

En plus du management, cette action consiste à établir des

directives pour les différentes combinaisons de matériaux pour le soudage économique et sans défauts d'alliages d'aluminium au moyen du FSW et du HLW.

Conclusion – ALUWELD II

On peut dire que le projet s'est passé comme prévu et que des résultats très prometteurs ont été obtenus pour les divers alliages d'aluminium. Le projet a fait apparaître que la recherche doit être poursuivie sur ces deux procédés de soudage afin d'en faciliter leur application dans l'industrie belge (surtout PME). Différentes entreprises du groupe de projet pensent sérieusement à appliquer le FSW et/ou HLW dans la production. Il est important pour ces entreprises que l'étude des possibilités de ces deux procédés soit poursuivie, non seulement sur d'autres matériaux (alliages non ferreux en général), mais également afin de rapprocher le soudage de la réalité dans l'entreprise. L'IBS a donc introduit une demande de poursuite du projet, ALUWELD II, auprès de l'IWV-Vlaanderen pour la biennale 2006-2007 (IWT 50736). Une fois le projet approuvé, les entreprises intéressées peuvent prendre contact avec l'IBS afin d'apprendre à connaître les possibilités de deux procédés de soudage innovateurs pour un apport limité (par ex. livraison du métal de base à souder). □

La recherche a montré que, avec l'équipement actuellement disponible chez UCL et VITO, la productivité du soudage hybride est nettement plus élevée (supérieure à 1 m/min); par contre, la résistance et la déformabilité des soudures FSW sont généralement plus élevées

Alliage	Procédé de soudage	Vitesse de soudage (mm/min)	Efficacité du joint vis-à-vis du métal de base	Allongement (%)	Pliabilité (essais de pliage approuvés)	Autres remarques
5083-H111 5 mm	FSW	100	1,01	25,2	8 / 8	meilleure tenue à la fatigue
	HLW	1.200	0,92	14,7	7 / 8	/
5754-O 4 mm	FSW	317	0,94	20,8	3 / 4	/
	HLW	1.500	0,97	pas disponible	2 / 2	/
5182-H111 1,5 mm	FSW	228	1,03	20,1	8 / 8	/
	soudage laser	4.200	0,94	14	4 / 4	/
6061-T6 4 mm	FSW	333	0,71	5,9	8 / 8	/
	HLW	1.800	0,7	3,8	3 / 4	bonne résistance à la corrosion
EN AC-46000 (pas coulé sous vide) 5 mm	FSW	109	1,07	0,2	pas disponible	microstructure très affinée
	HLW	360	0,83	pas disponible	pas disponible	haute porosité
6056-T4 2,5 mm	FSW	500	0,88	9,9	4 / 4	meilleure tenue à la fatigue
	HLW	3.600	0,83	3,7	0 / 4	/