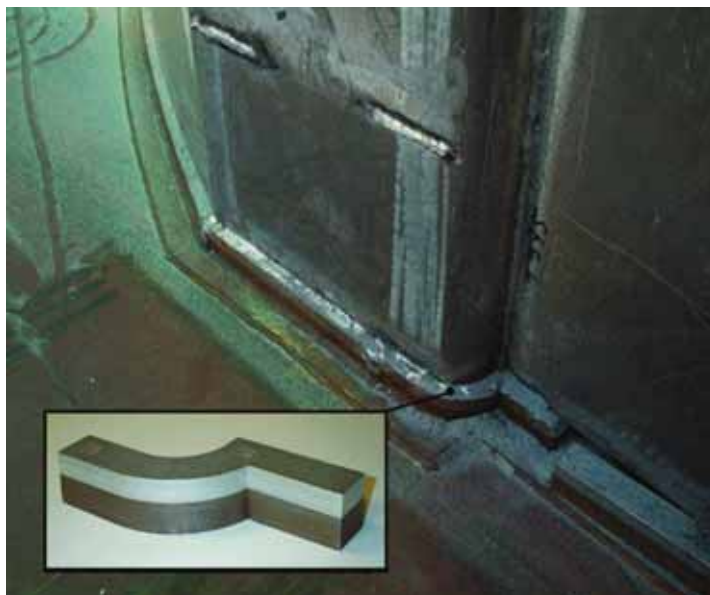


# ASSEMBLAGES ALUMINIUM-ACIER: DEVELOPPEMENTS RECENTS

## UN APERÇU

Cet article donne un aperçu de quelques techniques récentes prometteuses pour assembler de l'aluminium à de l'acier. Il semble, en effet, que de plus en plus d'évolutions dans le soudage permettent de combiner ces matériaux. Les méthodes d'assemblage purement mécaniques ou par collage ne sont pas prises en compte dans cet article.

 Par ir. Wim Van Haver et ir. Koen Faes, EWE  
Centre de Recherche de l'IBS  
(Traduction: M.C. RITZEN – IBS)



**Figure 1:** Pièce de transition soudée par explosion (voir détail) pour l'assemblage d'un pont en acier à une superstructure en aluminium dans la construction navale. Source: Triplate®

## INTRODUCTION

Le soudage est appliqué sur un grand nombre de matériaux dans de nombreux secteurs. Les avantages du soudage par rapport aux assemblages purement mécaniques ou au collage sont connus:

- construction plus légère (absence de recouvrement)
- moins de risques de fentes qui peuvent donner lieu à de la corrosion localisée
- transition plus continue entre les pièces

De nombreux métaux et leurs combinaisons sont bien soudables à condition de tenir compte des modes opératoires usuels. Cependant, il y a des combinaisons de matériaux qui sont très difficiles à réaliser et qui pourraient offrir des perspectives

intéressantes à de nombreuses entreprises. Le soudage de l'aluminium à de l'acier en est un très bon exemple. Le nombre de procédés pour avoir une soudure de qualité et reproductible, est très limité. Un exemple est le soudage par explosions pour le placage de l'aluminium sur une tôle d'acier pour, par ex., la construction navale ou la production d'éléments de transition (figure 1).

Au cours des dix dernières années, il y a eu cependant des évolutions diverses qui semblent pouvoir insuffler une nouvelle vie à ce rêve. Cet article a pour objectif de donner un aperçu sur l'état de la question d'une série de procédés avec mention des avantages et des inconvénients et les applications potentielles ou déjà commercialisées. Nous

espérons que celui-ci donnera matière à réfléchir au lecteur pour une innovation ou une optimisation dans sa propre production. L'IBS suit de près ces nouvelles techniques de façon à pouvoir conseiller et soutenir l'application de ces nouvelles techniques.

## POURQUOI SOUDER DE L'ALUMINIUM A DE L'ACIER?

Avant de parler de la problématique de l'assemblage de l'aluminium à de l'acier avec des procédés de soudage usuels (MIG/MAG, TIG), il faut d'abord répondre à la question suivante: pourquoi serait-on intéressé par la combinaison de ces matériaux? La majorité des applications où les assemblages aluminium-acier sont justifiés est dictée par l'utilisation optimale du matériau: l'emploi d'un matériau donné avec certaines propriétés, à un endroit précis. Un des secteurs le plus important où on tend à utiliser le matériau optimal est le "transport" dans le sens le plus large du terme: industrie automobile, construction navale, transport aérien et spatial, construction ferroviaire ... Les propriétés importantes dont on

peut tenir compte dans une application donnée sont:

- Résistance
- Rigidité
- Déformabilité
- Conductibilité
- Résistance à la corrosion
- Poids spécifique
- Coût du matériau

Sur certains de ces points, l'aluminium a un score bien meilleur que l'acier (poids spécifique, résistance à la corrosion, conductibilité thermique et électrique) et sur d'autres points il est moins bon (par ex. rigidité et coût). Dans le cas idéal, on obtient une construction qui satisfait à tous les critères cités ci-dessus. Grâce aux nouveaux procédés d'assemblage, il est possible d'utiliser l'aluminium en combinaison avec l'acier pour une application donnée,

précisément aux endroits où leurs propriétés spécifiques le justifient le plus étant donné qu'il est possible d'assembler ces matériaux très correctement de façon à former un seul ensemble.

## PROBLEMATIQUE

Qu'est-ce qui rend l'assemblage thermique de l'aluminium à l'acier si difficile? En fait, la réponse a deux facettes.

**LA GRANDE DIFFERENCE EN DILATATION THERMIQUE ET MODULE D'ELASTICITE AURA, PAR EX., POUR RESULTAT DES TENSIONS THERMIQUES ELEVEES QUI PEUVENT PRODUIRE DES DEFORMATIONS DEMESUREES OU DES TENSIONS RESIDUELLES**

| PROPRIETES DE BASE DU FER ET DE L'ALUMINIUM   |                         |                         |
|---|-------------------------|-------------------------|
|   | FER                     | ALUMINIUM               |
| POIDS SPECIFIQUE (kg/dm <sup>3</sup> )        | 7,85                    | 2,7                     |
| TEMPERATURE DE FUSION (°C)                    | 1536                    | 660                     |
| COEFF. DE CONDUCT. THERMIQUE (W/mK)           | 75                      | 238                     |
| COEFF. DE DILATATION THERMIQUE (1/K)          | 12,3 x 10 <sup>-6</sup> | 23,8 x 10 <sup>-6</sup> |
| MODULE D'ELASTICITE E (MPa)                   | 210.000                 | 72.000                  |
| RESISTANCE A LA TRACTION R <sub>m</sub> (MPa) | 270-410                 | 80                      |
| LIMITE D'ALLONGEMENT R <sub>p0,2</sub> (MPa)  | 180-250                 | 35                      |
| ALLONGEMENT APRES RUPTURE A <sub>s</sub> (%)  | 30                      | 42                      |
| POTENTIEL STANDARD DE L'ELECTRODE (V)         | -0,447                  | -1,662                  |

D'une part, il y a une grande différence entre les propriétés de l'aluminium et du fer. Le tableau en donne un aperçu basé sur la littérature.

La grande différence en dilatation thermique et module d'élasticité aura, par ex., pour résultat des tensions thermiques élevées qui peuvent produire des déformations démesurées ou des tensions résiduelles.

Une autre différence significative, importante après soudage, est la grande différence en potentiel standard d'électrode: le fer est beaucoup plus noble (moins négatif) que l'aluminium ce qui a pour conséquence que des mesures doivent être prises pour éviter de la corrosion galvanique excessive du côté de l'aluminium: par ex., utilisation de couches protectrices (utiliser de l'acier galvanisé) ou éviter un contact avec un électrolyte (comme l'eau).

D'autre part, il existe une très grande affinité entre l'aluminium et le fer ce qui constitue en fait un plus grand défi pour réaliser un assemblage thermique de qualité. Le diagramme d'état binaire du Fe-Al est très complexe. Différents assemblages intermétalliques apparaissent, tels que  $Fe_3Al$ ,  $Fe_2Al_5$  et  $FeAl_3$ .

La solubilité du Fe dans l'Al solide est négligeable de telle sorte que du  $FeAl_3$  se forme très rapidement tandis que du Fe solide peut dissoudre une quantité significative d'Al (par ex. 11% à 400 °C) (voir figure 2).

Lors de l'assemblage thermique du fer et de l'aluminium, des assemblages intermétalliques indésirables apparaissent donc rapidement.

Même après traitement thermique, certaines phases intermétalliques subsistent.

Typiquement, dans un assemblage thermique, on a du  $Fe_2Al_5$  (dureté: 1000-1100 HV) du côté de l'acier et du  $FeAl_3$

(dureté: 820-980 HV) du côté de l'aluminium.

Ce sont donc des phases très dures et très fragiles qui peuvent avoir un impact catastrophique sur les propriétés mécaniques de l'assemblage.

On estime souvent que, si la couche intermétallique est inférieure à 10 µm, une soudure suffisamment résistante peut être réalisée dont la résistance est plus influencée par les propriétés du matériau de base que par celles des phases intermétalliques fragiles.

Dans le cas des procédés de soudage par fusion où seul le côté aluminium est fondu (éventuellement avec utilisation d'un métal d'apport aluminium), on dépose souvent une couche de zinc du côté de l'acier. Ceci permet de limiter l'épaisseur de la couche intermétallique; l'acier est mieux humidifié par l'aluminium en fusion et l'apparition de corrosion galvanique dans la soudure est limitée.

**TECHNIQUES DE SOUDAGE PROMETTEUSES POUR L'ASSEMBLAGE ALUMINIUM-ACIER**

Dans le cas des techniques citées ci-après, l'acier n'est jamais fondu. En raison des températures très élevées, l'aluminium est très liquide, avec toutes les conséquences y afférentes. La conductibilité thermique beaucoup plus élevée de l'aluminium rend la fusion de l'acier naturellement beaucoup plus difficile. En outre, plus la température est élevée, plus long est le temps de refroidissement et plus de phases intermétalliques se forment.

Dans les techniques ci-après, ou bien le côté de l'aluminium est fondu avec un faible apport calorifique (CMT, ColdArc, soudage au laser), ou bien

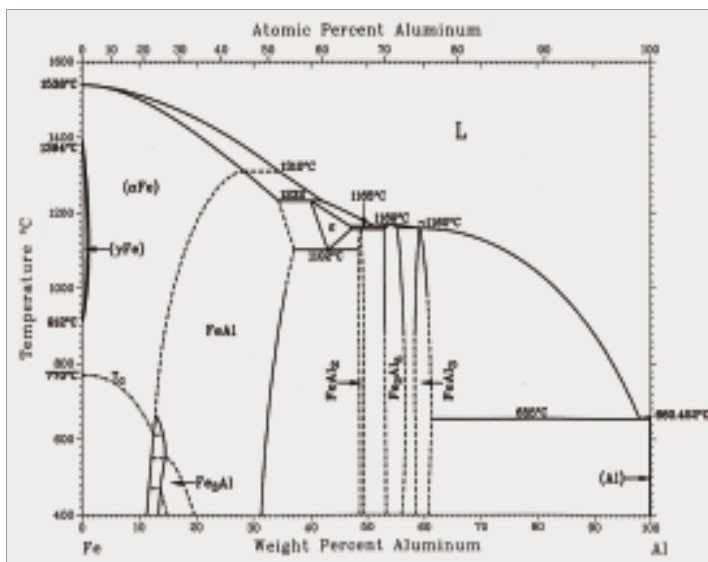


Figure 2: Diagramme d'état binaire du fer et de l'aluminium

l'assemblage est réalisé sans aucune fusion en faisant appel à la déformation plastique (soudage par friction, soudage friction stir et soudage par impulsion magnétique).

électrique va s'allumer spontanément suite à la température élevée et l'augmentation de la tension.

Après le transfert du métal, le fil est de nouveau alimenté et le courant augmente de telle sorte que le transfert de métal suivant peut se faire. Avec ce procédé, l'aluminium et l'acier peuvent être assemblés avec succès (figure 3). En raison du faible apport calorifique, la

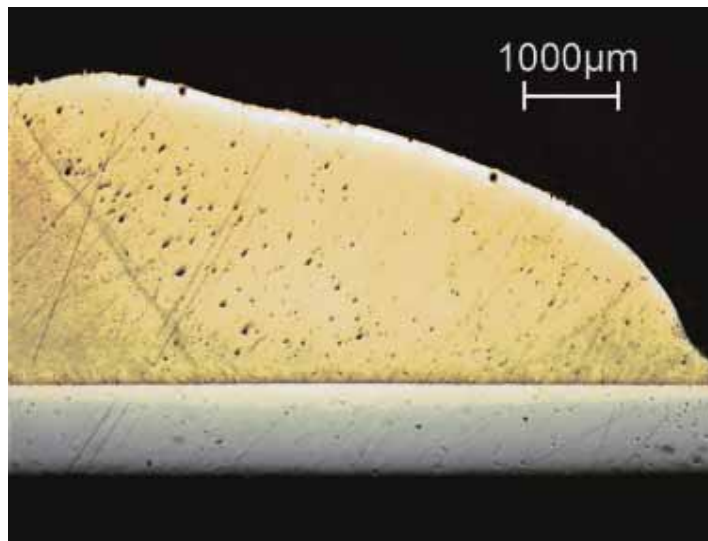
**LORS DE L'ASSEMBLAGE THERMIQUE DU FER ET DE L'ALUMINIUM, DES ASSEMBLAGES INTERMETALLIQUES INDESIRABLES APPARAISSENT RAPIDEMENT**

**CMT et ColdArc**

Le procédé "Cold Metal Transfer" (CMT), récemment développé par Fronius, est une variante du procédé de soudage MIG/MAG. Le CMT est un procédé de soudage à l'arc en court-circuit avec une toute nouvelle méthode de détachement des gouttes du fil de soudage. Par accouplement du dévidage du fil au déroulement du courant et de la tension, ce procédé permet de souder avec un apport calorifique très faible. En retirant légèrement le fil de soudage après le contact avec la pièce et en limitant le courant de soudage, le transfert de métal est réalisé sans projections. L'arc

formation d'une couche intermétallique peut être limitée. La coupe transversale de la figure 3 laisse nettement voir que l'aluminium (au-dessus) est brasé à l'acier (en dessous). Jusqu'ici, la plupart des recherches se sont axées sur l'assemblage de l'aluminium à de l'acier galvanisé où la couche de zinc améliore l'humidification par l'aluminium fondu. La technique ColdArc de EWM

Figure 3: Soudure à recouvrement réalisée avec le procédé CMT entre une tôle supérieure en aluminium et une tôle inférieure en acier. Sur la figure de droite, on peut voir que l'aluminium est en fait brasé à l'acier. Source: Fronius



est une variante du soudage à l'arc par court-circuit. Avec ce procédé, le fil de soudage n'est pas retiré pour provoquer le transfert de métal (comme c'est le cas dans le procédé CMT). Le très faible apport calorifique est obtenu en modifiant le déroulement de courant par l'application d'un nouveau type de commutation à haute dynamique (invertisseur) et ce, en combinaison avec un contrôle rapide et digital du processus. Cette technique permet également de souder l'aluminium à de l'acier.

Le procédé ColdArc peut être manuel ou automatisé. Le procédé CMT est surtout approprié pour l'automatisation et la robotisation mais, d'ici peu, il pourrait être utilisé manuellement. Il faut noter que les procédés de soudage CMT et ColdArc, appliqués sur l'acier et l'acier inoxydable, vont faire l'objet d'une étude dans le cadre du projet de recherche collective INNOLAS menée par l'IBS-OCAS. Ce projet, subsidié par l'IWT-Vlaanderen, vient de démarrer et se poursuivra jusqu'en avril 2009.

### Techniques d'assemblage par laser

Un laser permet de souder avec un très faible apport calorifique car toute l'énergie est concentrée dans un fin rayon. Des vitesses de soudage élevées peuvent être atteintes. Il existe différentes possibilités permettant de réaliser des soudures de qualité au laser entre l'aluminium et l'acier. Dans la plupart des procédés de soudage au laser, l'aluminium est fondu (avec ou sans métal d'apport) et l'acier est humidifié par l'aluminium fondu. Les facteurs cruciaux sont le positionnement du rayon laser ainsi que l'appareillage de clamage. Les procédés de soudage au laser ont pour avantage d'avoir une vitesse de soudage plus élevée que celles obtenues avec le CMT et le ColdArc mais, d'un autre côté, les tolérances sont très importantes: l'écartement doit être aussi étroit que possible.

Afin de résoudre le problème de cette faible flexibilité, l'institut de recherche allemand BIAS a mis au point deux procédés de soudage au laser hybride (Hybrid Laser Welding, HLW) spécialement pour l'assemblage de l'aluminium à de l'acier, avec maintien de la productivité du soudage au laser: le procédé de soudage hybride laser-MIG et le

procédé de soudage hybride laser-plasma.

Avec le procédé de soudage hybride laser-MIG, on peut souder bout à bout 2 mm d'aluminium à de l'acier avec une vitesse de soudage allant jusqu'à 4 m/min! De plus, ce procédé permet de souder un chanfrein jusqu'à 1 mm. Des exigences nettement plus faibles peuvent ainsi être posées à la préparation du joint.

En plus de la production de tôles planes de différentes épaisseurs ou de différents matériaux qui sont soudés avant étirage pour l'industrie automobile, BIAS voit également des possibilités d'application dans la construction navale entre autres.

Dans le cadre de projets de recherche collective subsidiée par l'IWT, ALUWELD (terminé début 2006) et HYLAS (en cours jusqu'à début 2008), l'IBS a pu acquérir beaucoup d'expérience en ce qui concerne le HLW des alliages d'aluminium et des aciers. En Belgique, VITO et OCAS disposent d'appareillages hybrides laser-MIG/MAG; de plus, VITO a depuis peu un appareillage hybride laser-plasma.

Dans le cadre de ce chapitre, il est bon de mentionner également le "Fluxless Laser Brazing" qui a été récemment mis au point par Corus RD&T.

Avec ce procédé, comme dans le cas du CMT, le côté aluminium est fondu à l'aide du métal d'apport en aluminium tandis que le côté acier est brasé (figure 4). La couche intermétallique du côté de l'acier n'aurait qu'une épaisseur de l'ordre de 1 µm. L'avantage de cette technique par rapport au soudage au laser classique est qu'aucun flux ne doit être appliqué qui peut être une source de corrosion. Ceci vaut d'ailleurs également pour les procédés de soudage hybride au laser. Avec le brasage sans flux, Corus s'adresse en particulier à l'industrie automobile.

### Soudage par friction

Dans le cas du soudage par friction conventionnel par rotation, deux pièces (dont au moins une à géométrie symétrique en rotation) sont pressées l'une contre l'autre. Une des pièces est mise en rotation de telle façon que celle-ci est échauffée par friction jusqu'à une température inférieure au point de fusion et ensuite soumise à un forgeage. L'essentiel ici est la température relativement basse qu'atteint le

**LE SOUDAGE PAR FRICTION CLASSIQUE EST LIMITE CAR AU MOINS UNE DES DEUX PIÈCES DOIT ÊTRE SYMÉTRIQUE EN ROTATION TANDIS QUE LE FSW PERMET DE SOUDER DES TOILES ET DES PROFILES EN BOUT A BOUT ET AVEC RECOUVREMENT**

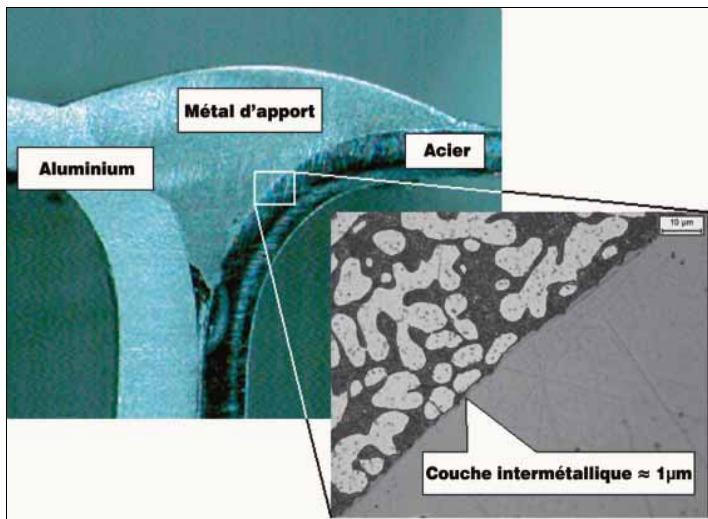


Figure 4: Assemblage aluminium-acier réalisé avec "fluxless laser brazing"

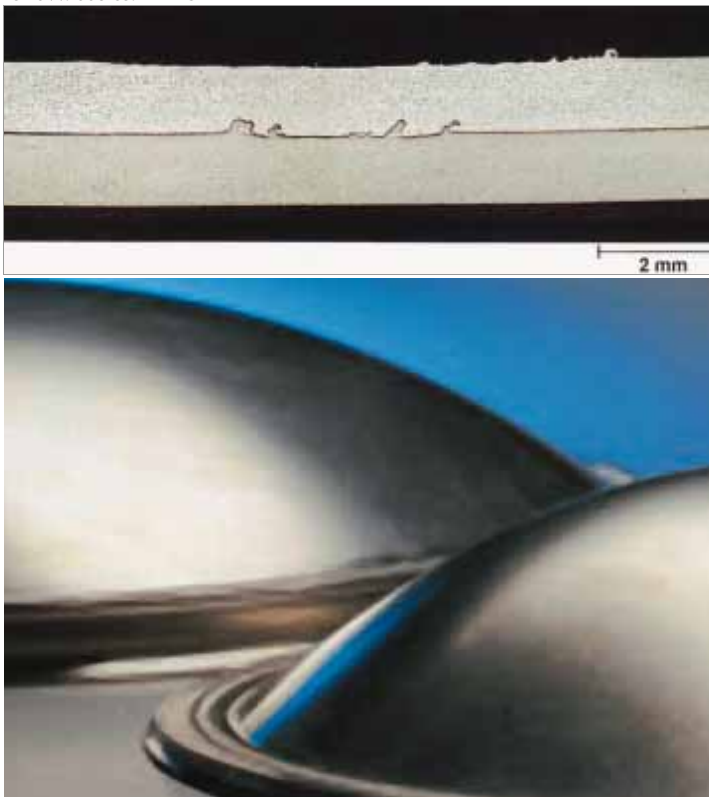
Source: Corus



Figure 5: Pièce de photocopieuse composée d'un corps en aluminium et d'extrémités en acier inoxydable, soudés l'un à l'autre à l'aide du soudage par friction

Source: Manufacturing Technology, Inc.

Figure 6: Éléments d'appareil pour radiographie composé d'un anneau en acier inoxydable et d'un couvercle sphérique en aluminium, soudés avec recouvrement avec le FSW. Source: RIFTEC



matériau. Ce qui est spécifique lors du soudage aluminium-acier est que la formation de la couche intermétallique reste limitée de telle sorte que des propriétés mécaniques admissibles peuvent être obtenues.

Les applications les plus connues du soudage par friction aluminium-acier sont les suspensions anodiques pour la production d'aluminium, les pièces pour photocopieuses (figure 5), les appareils sous pression cryogéniques et les ustensiles de cuisson.

A court terme, l'IBS disposera à nouveau d'une machine de soudage par friction.

En plus du soudage par friction par rotation, il existe également le soudage par friction orbital et linéaire où il n'est pas obligatoire qu'une pièce ait une section circulaire.

**Friction stir welding**

Lors du friction stir welding (FSW) (soudage par friction malaxage), la pièce est échauffée par friction, comme c'est le cas avec le soudage par friction.

Mais, dans le cas du FSW, la chaleur de friction est créée entre un outil en rotation réutilisable et la surface des pièces à assembler.

La partie de l'outil enfoncée dans le matériau (le pion) assure en outre le mélange mécanique des pièces à souder. Lors du FSW, on n'a pas de fusion à proprement dit de telle sorte que la formation de phases intermétalliques est limitée.

Le soudage par friction classique est limité car au moins une des deux pièces doit être symétrique en rotation tandis que le FSW permet de souder des tôles et des profilés en bout à bout et avec recouvrement.

La figure 6 montre un exemple d'une application commerciale du FSW de l'aluminium sur l'acier inoxydable (avec recouvrement). Le soudage par points est également possible avec le FSW. Cette technique est déjà appliquée à l'échelle industrielle chez Mazda.

Pour le soudage par points de l'aluminium, Mazda déclare un coût d'investissement moindre de 40% par rapport au soudage par résistance (il n'est pas sûr que les frais de licence du FSW aient été pris en compte) ainsi qu'une diminution en consommation d'énergie lors du soudage de 99%!

La figure 7 montre le tout premier exemple d'une application commerciale d'un assemblage

aluminium-acier à l'aide du FSW. La couche de zinc sur l'acier a, en plus de la limitation de corrosion galvanique, une influence positive en ce qui concerne la formation de phases intermétalliques néfastes.

Des recherches sont menées mondialement sur le FSW de l'aluminium et de l'acier en raison du haut intérêt porté par l'industrie automobile.

Un sujet important est le choix et la mise au point du matériau de l'outil.

En Belgique, CEWAC possède un appareillage FSW qui est à même de souder de l'acier à de l'aluminium.

L'IBS collabore actuellement avec le CEWAC au projet CASSTIR, subsidié par le SPF de programmation Politique Scientifique, consacré au FSW des alliages d'aluminium.

**LE CHOIX DE LA TECHNIQUE LA PLUS APPROPRIÉE DÉPEND DE L'APPLICATION, DE L'IMPORTANCE DES SÉRIES ET DE LA NATURE DE L'ASSEMBLAGE (SOUDURE PAR POINT, SOUDURE AVEC RECOUVREMENT OU SOUDURE BOUT À BOUT)**

**Soudage par impulsion magnétique**

Au contraire des techniques mentionnées ci-avant, à l'exclusion du soudage par explosions, le soudage par impulsion magnétique (MPW) n'utilise pas de chaleur pour réaliser une soudure.

Lors du MPW, une bobine est placée au-dessus des pièces à souder mais sans être en contact avec celles-ci. Durant le cycle de soudage, une très grande quantité d'énergie électrique est libérée en un laps de temps très court.

Ce flux élevé d'énergie traverse la bobine et cette décharge de courant induit des courants de Foucault dans la pièce externe. La répulsion entre les deux champs magnétiques développe une force qui donne une très grande vitesse (> 1000 km/h) à la pièce externe en direction de la pièce interne. Ceci provoque une déformation rémanente, sans retour de la pièce à sa forme initiale. Le procédé est approprié pour l'assemblage de produits tubulaires dans une configuration à recouvrement.

Le soudage aluminium-acier appartient également aux possibilités de ce procédé. La figure 8 montre un exemple d'une application possible: en utilisant un corps en aluminium, une économie en poids de 1 kg par mètre peut être réalisée.

L'IBS va présenter un projet de recherche collective auprès de l'IWV-Vlaanderen pour la biennale 2008-2009.

La recherche ne sera naturellement pas limitée à l'aluminium-acier; de nombreuses combinaisons sont concevables



**Figure 7:** Mazda MX-5 (au-dessus), la première application commerciale du friction stir spot welding (FSSW) entre l'aluminium et l'acier galvanisé. Le couvercle de coffre (en dessous) est assemblé à l'aide du FSSW avec des boulons d'ancrage (coins supérieurs à gauche et à droite). Source: Mazda



**Figure 8:** Arbre de commande constitué d'un tuyau en aluminium et de pièces en acier, assemblés avec le soudage par impulsion magnétique. Source: Pulsar

(acier-acier, aluminium-aluminium, aluminium-cuivre ...). Les entreprises désirant apprendre à connaître les possibilités de la technique MPW pour leurs propres produits peuvent participer à ce projet de recherche et prendre contact avec l'IBS aussi rapidement que possible.

**CONCLUSION**

Cet article permet de montrer que les développements dans le

soudage offre, en effet, des possibilités pour la réalisation d'assemblages de qualité acier-aluminium.

Le choix de la technique la plus appropriée dépend de l'application, de l'importance des séries et de la nature de l'assemblage (soudure par point, soudure avec recouvrement ou soudure bout à bout).

Les entreprises intéressées par l'une ou l'autre technique peuvent toujours prendre contact avec l'IBS. □