

ASSEMBLAGE DE MATERIAUX DISSEMBLABLES

LE PROCEDE DE SOUDAGE PAR IMPULSION MAGNETIQUE

Fin 2011, le projet de recherche collective de deux ans 'Technologie de soudage avancée par impulsion magnétique' (SOUDIMMA) s'est terminé. Cette recherche a été menée par l'Institut Belge de la Soudure (IBS), en collaboration avec le partenaire wallon CEWAC (Centre d'Etudes wallon de l'assemblage et du contrôle des matériaux, de Seraing) et a été subventionnée par la Région wallonne (projet n° 816944). Le projet a été consacré au soudage par impulsion électromagnétique, procédé de soudage similaire au soudage par explosion. Le procédé utilise des forces électromagnétiques pour déformer et souder des matériaux. Etant donné que ces techniques ne font pas usage de chaleur pour réaliser l'assemblage, elles offrent d'importants avantages par rapport aux techniques de soudage conventionnelles.

Par dr. ir. Koen Faes, EWE, Institut Belge de la Soudure,
ir. Nicolas Debroux, CEWAC & prof. dr. ir. Wim De Waele, Labo Soete, Ugent
Traduction: M.C. Ritzen – IBS

FONCTIONNEMENT

Le soudage par impulsion magnétique appartient au groupe des procédés de soudage par pression qui permettent de réaliser un assemblage entre deux surfaces, atomiquement pures, en les pressant l'une contre l'autre. Le soudage par impulsion magnétique est un procédé par pression où la déformation se fait très rapidement. Le principe de fonctionnement du soudage par impulsion magnétique est semblable à celui du soudage par explosion mais la force explosive est générée par des forces électromagnétiques générées par une bobine. Le procédé de soudage par impulsion magnétique est un procédé de soudage à l'état solide, ce qui signifie que le métal n'est pas mis en fusion durant le cycle de soudage. La propagation de la chaleur durant le processus est minime et très locale

(zone de $\pm 10 \mu\text{m}$) de sorte que tous les problèmes conventionnels de soudage dus à l'apport calorifique et à la perte des propriétés du matériau sont évités. Le procédé peut être utilisé pour l'assemblage de produits tubulaires dans une configuration à recouvrement. L'absence de chaleur durant le cycle de soudage permet d'assembler des matériaux ayant un point de fusion très différent. Les premiers développements ont concerné des assemblages de tubes aluminium/acier, aluminium/cuivre et aluminium/aluminium, cuivre/acier et cuivre-cuivre. Jusqu'à présent, seule une faible quantité de combinaisons de matériaux a été étudiée.

INSTALLATION DE L'IBS ET DESCRIPTION DE LA CONFIGURATION D'ESSAIS

Tous les essais ont été exécutés avec une machine de soudage par

impulsion magnétique Pulsar 50/25 (**figure 1**) avec une énergie de charge maximale de 50 kJ (ce qui correspond à une tension maximale de charge de condensateur de 25 kV) et une fréquence de décharge circuit de 14 kHz. La capacité totale de la batterie de condensateurs est de 160 μF . La pression résultant du flux magnétique induit par la bobine multi-spires est concentrée sur la zone du processus en utilisant un 'field-shaper' (concentrateur de champ; **figure 2**). Les pièces à souder sont placées à l'intérieur du field-shaper en configuration de recouvrement. Divers jeux de paramètres ont été étudiés:

- l'espace entre le tube et la pièce interne: cette distance est nécessaire pour assurer l'accélération du tube et obtenir la vitesse d'impact désirée;
- le diamètre et l'épaisseur du tube;
- la position des pièces relative au

field-shaper: ceci détermine, entre autres, l'angle d'impact;

- la tension de charge des condensateurs, déterminant le niveau d'énergie.

AVANTAGES ET LIMITATIONS

- Comme le procédé utilise de la pression et pas de la chaleur, tous les problèmes conventionnels de soudage dus au cycle de chaleur et à la perte des propriétés du matériau sont évités.
- Dans le cas d'une exécution correcte, la soudure est plus résistante que le métal de base le plus faible: lors d'un essai, la rupture se fait toujours en dehors de la zone de la soudure.
- Les gaz de protection, métaux d'apport ou autres accessoires sont inutiles.
- Le procédé de soudage par impulsion magnétique est un procédé de

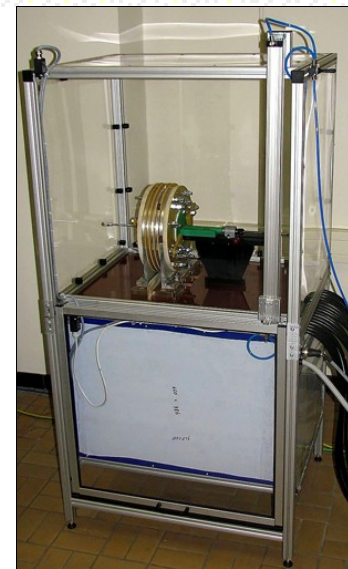


Figure 1: machine de soudage Pulsar

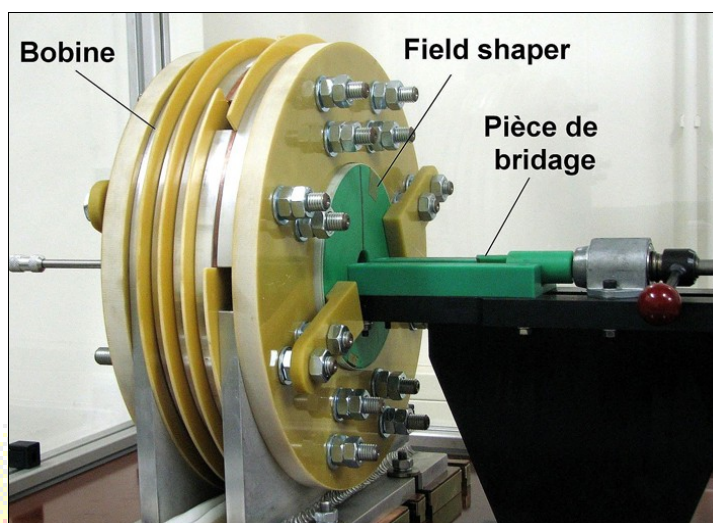


Figure 2: bobine multi-spires

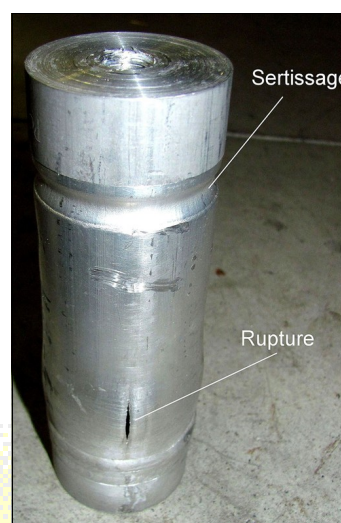


Figure 3: sertissage par impulsion magnétique d'un tube en aluminium avec une pièce interne



Figure 4: soudage des tubes en cuivre sur des pièces en acier inoxydable

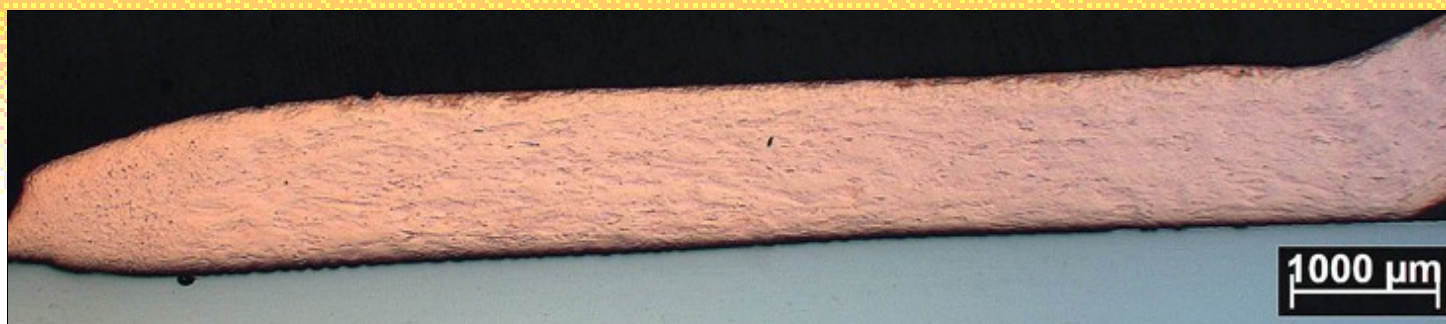


Figure 5a: interface d'une soudure cuivre/acier inoxydable (x12)



Figure 5b: interface d'une soudure cuivre/acier inoxydable, non attaquée (x200)

soudage 'froid'. Les matériaux n'atteignent pas plus de 30 °C. Ceci signifie qu'après soudage, les pièces peuvent être immédiatement retirées de la machine de soudage et mises en œuvre.

- Vitesse de production élevée; 10 pièces à la minute, en fonction du degré d'automatisation.
- Procédé de soudage écologique: on ne produit pas de chaleur, rayons UV, gaz ou fumées.

Une condition pour le soudage par impulsion magnétique est que le matériau à déformer ait une bonne conductibilité électrique. Sinon il faudra augmenter l'énergie qui est nécessaire pour générer des courants de Foucault. Une autre condition est que les surfaces à assembler doivent se chevaucher.

PRINCIPAUX RESULTATS

Une série d'entreprises, actives dans divers secteurs (construction aéronautique et spatiale, construction générale, air conditionné, ...), est surtout intéressée par des combinaisons de matériaux comme cuivre/aluminium, aluminium/acier ou cuivre/acier inoxydable. La faisabilité de la technique pour les applications des entreprises participantes a été étudiée. Elles ont fourni des renseignements sur leurs applications et les matériaux qu'ils utilisent (type, épaisseur, forme, ...). Le choix des matériaux à examiner a été basé sur cette information et est donc représentatif des matériaux actuellement utilisés dans les entreprises du groupe cible. Les combinaisons des matériaux à souder proposés par les entreprises étaient:

- aluminium/aluminium
- aluminium/acier
- aluminium/cuivre

- cuivre/laiton
- cuivre/acier
- cuivre/aluminium
- cuivre/acier inoxydable

Le procédé de soudage par impulsion magnétique a été appliqué à des pièces tubulaires dans plusieurs séries d'essais. Le procédé est très approprié pour souder des tubes pour le HVAC (air conditionné, ventilation et chauffage) et pour des applications automobiles.

L'application la plus évidente est le soudage des tubes. En utilisant la technique de soudage par impulsion magnétique, seuls des joints en configuration par recouvrement peuvent être réalisés. Lors des essais exécutés dans le cadre du projet 'Soudimma', une pièce intérieure pleine a été utilisée. Il est beaucoup plus facile de travailler dans cette configuration, car aucun mandrin n'est nécessaire. La pièce interne possède un collier, qui s'adapte dans le tube externe. Le diamètre de

la pièce à l'endroit de la soudure détermine l'espacement entre le tube externe et la pièce pleine (stand-off distance). La faisabilité du procédé par impulsion magnétique a été étudiée pour les entreprises ayant marqué leur intérêt. Si la faisabilité était évaluée positivement, des pièces étaient préparées pour la confection de pièces de démonstration.

ALUMINIUM/ALUMINIUM

L'application la plus simple concerne l'assemblage de l'aluminium avec l'aluminium. La soudabilité de l'aluminium a déjà été montrée auparavant, c'est pourquoi le sertissage par impulsion magnétique a été étudié comme alternative. On a utilisé des tubes en aluminium (EN AW-6060) ayant un diamètre de 50 mm et une épaisseur de paroi de 1,5 mm. Un des inconvénients des assemblages par sertissage est la non étanchéité. Afin d'y remédier,

des 'O-rings' conventionnels en caoutchouc ont été placés dans une entaille réalisée au préalable. Le sertissage du tube sur la pièce interne comprime l'O-ring, ce qui assure l'étanchéité. Les assemblages obtenus ont été testés au CEWAC à l'aide d'un essai d'étanchéité à l'hélium et un essai de pression hydraulique. Les résultats ont été très positifs: les assemblages n'ont pas présentés de fuites (débit: $2 \cdot 10^{10}$ mbar.l./sec) et ont pu résister à une pression hydraulique interne de 100 bars. Durant l'essai de pression, une rupture est apparue dans le tube en aluminium (figure 3).

CUIVRE/ACIER INOXYDABLE

Comme cette combinaison de matériaux apparaît souvent dans les applications frigorifiques, la faisabilité a été étudiée. Les essais de soudage ont été réalisés avec des tubes en cuivre ayant un diamètre de 25 mm et une épaisseur de paroi de 1,0 mm. La pièce interne était en acier inoxydable AISI 316. La figure 4 montre une représentation d'une pièce soudée. L'examen métallographique de l'interface de la soudure est montré aux figures 5a, 5b et 5c. La soudabilité a été estimée positive. Il existe une large plage de soudage ce qui veut dire qu'on a un large choix de paramètres pour obtenir une soudure.

CUIVRE/ACIER

Par analogie avec la combinaison de matériaux précédente, la soudabilité du cuivre à l'acier a également été évaluée. Les essais ont été réalisés avec des tubes de 25 mm de diamètre et une épaisseur de paroi de 2,0 mm. Les soudures ont

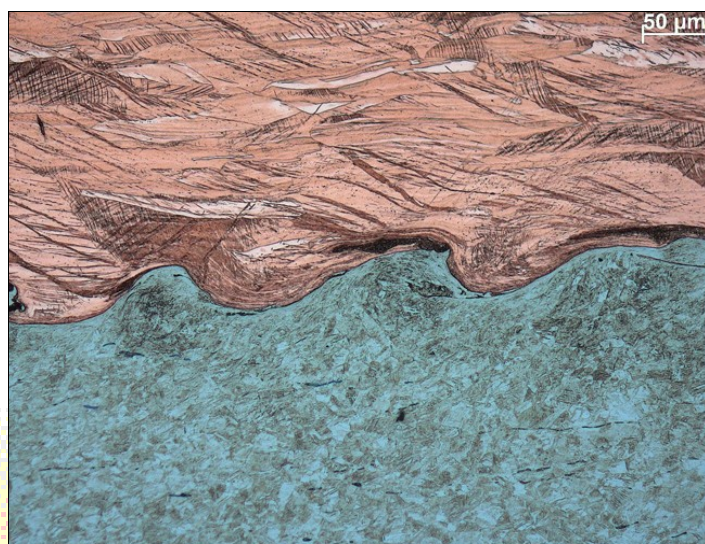


Figure 5c: interface d'une soudure cuivre/acier inoxydable attaquée (x12)

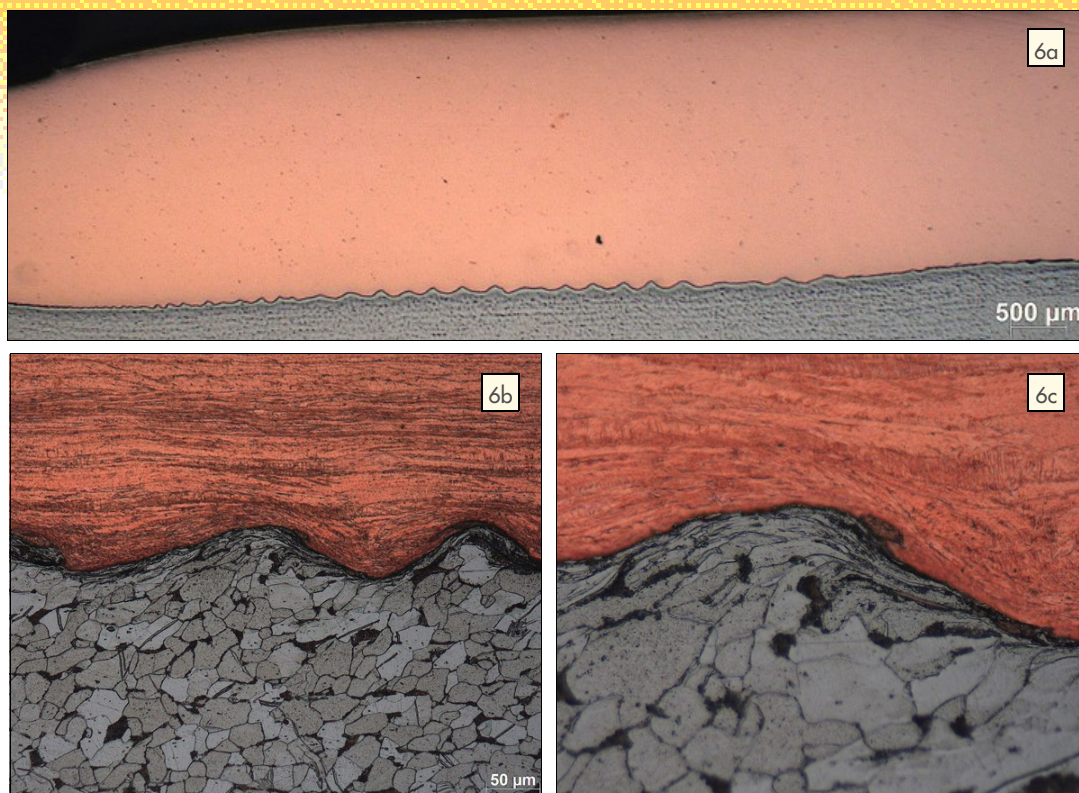


Fig. 6a: section métallographique d'une soudure cuivre/acier typique (x12)
Fig. 6b: interface d'une soudure cuivre/acier (x200); **Fig. 6c:** interface d'une soudure cuivre/acier (x500);
Fig. 7: soudure aluminium/acier typique

été évaluées par examen métallographique, mesures de dureté et essais d'étanchéité à l'air. L'interface de soudure a un profil en vagues typique (**figures 6a, 6b et 6c**), semblable aux joints réalisés en soudage par explosion. Cette zone de transition entre matériaux hétérogènes est censée être provoquée par le mélange mécanique, une intense déformation plastique et/ou la fusion locale.

ALUMINIUM/ACIER

Les essais ont été réalisés avec des tubes de 45 mm de diamètre et une épaisseur de paroi de 1,5 mm. Diverses combinaisons de paramètres ont été employées (**figure 7**). Pour toutes les soudures, un examen visuel et métallographique ont été exécutés. Quelques soudures ont également subi des mesures de dureté et l'analyse par SEM (microscope à balayage électronique). Dans certaines soudures, une couche intermétallique a été formée pendant le cycle de soudage (**figure 8**). Dans certains cas (paramètres de soudage non appropriés), la couche

intermétallique n'a pas pu résister aux contraintes résiduelles de la soudure. Cette couche intermétallique a été plus amplement étudiée par microscopie électronique. L'analyse EDX de la couche intermétallique a démontré que la couche est un mélange de deux matériaux et est composée de 75 à 80% d'aluminium et de 20 à 25% de fer. Une filiation de dureté a été réalisée. Afin d'examiner les couches intermétalliques, des mesures de dureté ont été réalisées. Il apparaît que ces couches peuvent avoir une dureté élevée dans le cas de paramètres de soudage inappropriés (jusqu'à 400 HVO, 1). Une coupe métallographique d'une soudure saine est montrée aux **figures 8a et 8b**. Aucun défaut de soudure n'a été observé.

CARACTERISATION DESTRUCTIVE ET NON DESTRUCTIVE

Des méthodes de contrôles destructives et non destructives ont été utilisées pour évaluer la qualité des soudures: tests d'étanchéité, tomographie assistée par ordinateur,

examen microscopique, essais de dureté, essai de compression, essai de torsion. De nombreuses applications dans l'industrie HVAC, frigorifique et automobile exigent une soudure étanche. Un test d'étanchéité a donc été mis au point non seulement pour détecter la fuite et la localiser mais également pour quantifier la fuite. La configuration de l'essai est une combinaison du test à bulles et du test de chute de pression. Une fuite est détectée par l'immersion de la soudure et est quantifiée par la mesure de la chute de pression à l'aide d'un manomètre de précision et la mesure du temps. Si aucune fuite n'est présente, les pièces sont examinées au microscope pour déterminer la longueur de la soudure, la forme de l'onde et la présence de phases intermétalliques. Des essais de compression et de torsion ont été réalisés pour déterminer la résistance au cisaillement de la zone soudée. L'essai de torsion sur les soudures saines a provoqué la rupture de la tige intérieure. La résistance de la soudure dépasse donc la résistance du matériau de base. L'essai de

compression (**figure 9**) a permis de constater que la résistance au cisaillement augmente avec le niveau d'énergie utilisée durant le soudage. Pour les soudures de haute qualité, la résistance au cisaillement dépasse la résistance au flambage du tube.

CONCLUSION

L'IBS est un précurseur dans la recherche sur l'application du soudage par impulsion magnétique. Le soudage par impulsion magnétique est une méthode relativement jeune – ayant cependant déjà quelques applications industrielles – basée sur l'utilisation de forces électromagnétiques pour souder des pièces. Différentes combinaisons de matériaux (aluminium/acier, cuivre/aluminium, ...) ont été soudées avec succès. Cette méthode de soudage ne fait pas usage de chaleur de telle sorte que des matériaux à point de fusion très différent peuvent être assemblés avec cette technique de soudage. Le procédé possède un potentiel réel pour la réalisation rapide et économique de ces assemblages. □

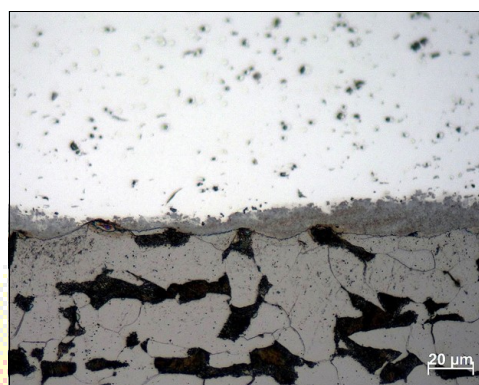


Figure 8a: interface d'une soudure aluminium/acier (attaquée) (x500)



Figure 8 b: interface d'une soudure aluminium/acier (attaquée) (x200)



Figure 9: test de compression