

ASSEMBLAGE THERMIQUE DE TOLES EN MATERIAUX DISSEMBLABLES

PROJET CORNET EUROPEEN INNOJOIN

L'assemblage thermique de tôles en matériaux dissemblables a été étudié dans le cadre du projet Cornet européen 'InnoJoin'. Des avancées ont été réalisées récemment pour un certain nombre de procédés de soudage, permettant de souder des combinaisons de matériaux dissemblables. Ce projet englobait un large éventail de technologies de soudage, livrées par le consortium Institut Belge de la Soudure (IBS, Belgique), KU Leuven – De Nayer (KUL, Belgique), Centre d'Etudes Wallon d'Assemblage et du Contrôle des Matériaux (CEWAC, Belgique), Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV Hülle, Allemagne) et Laboratorium für Werkstoff- und Fügtechnik (LWF, université Paderborn, Allemagne), et un large éventail de matériaux. On s'attendait donc à des solutions novatrices pour des applications industrielles. Les partenaires ont également utilisé leurs connaissances et leurs expériences spécifiques en matière de méthodes d'essais destructives et non destructives, pour générer des résultats comparables, cohérents et corrects.

Koen Faes et Irene Kwee, Institut Belge de la Soudure

RECHERCHE APPLIQUEE

Dans le cadre de ce projet, l'IBS a étudié l'applicabilité du soudage par points par friction (soudage friction spot) et du soudage par impulsion électromagnétique pour l'assemblage de métaux dissemblables. Le projet a permis de mieux comprendre ces nouvelles technologies pour l'assemblage de matériaux dissemblables et a permis à des entreprises d'identifier la technologie d'assemblage adéquate pour leurs produits. Les technologies d'assemblage étaient examinées objectivement. Les entreprises participantes pouvaient donc faire un choix étayé concernant l'implémentation ou non d'un assemblage de matériaux hétérogènes, sur la base de recherche appliquée. Dans le cadre du projet, un certain nombre de cas représentatifs ont également été élaborés, sur la base de l'apport des entreprises participantes.

NOUVEAUX PROCEDES

Le but de cet article est de donner une vue d'en-

semble d'un certain nombre de ces procédés pour l'assemblage de tôles. Nous espérons que cela incitera le lecteur à réfléchir à un usage innovant de matériaux ou à l'optimisation dans sa propre production. L'IBS suit ces avancées et ces nouvelles techniques de près et peut ainsi aider et soutenir les entreprises lors de leur implémentation. Les différentes technologies d'assemblage ont été réparties en quatre groupes principaux: le soudage par résistance, le soudage par friction, le soudage à l'arc et le soudage par pression.

Groupe 1: soudage par résistance

Au sein du soudage par résistance, on distingue deux variantes: le soudage par résistance avec bande process et le soudage par résistance avec élément. Avec un nouveau type de pinces de soudage par points, on travaille avec une bande process ('resistance spot welding with process tape'), placée entre les électrodes et les tôles à souder (voir **figure 1**). Cette bande permet d'influencer les résistances de contact et le développement de chaleur. Il est ainsi possible de souder des

matériaux de différentes épaisseurs et même dissemblables. Cette bande glisse après chaque soudure plus loin sur les électrodes. Cela protège les électrodes et la pièce, et évite l'usure des électrodes. On est ainsi parvenu à résoudre quelques-uns des principaux problèmes du soudage par points conventionnel. D'autres avantages du procédé sont la reproductibilité des soudures par points et une disponibilité bien plus importante du nouveau procédé de soudage par points par rapport au soudage par points conventionnel. Une autre technique de soudage par résistance, le soudage par résistance avec élément ('resistance element welding'), utilise un matériau d'apport, appelé rivet de soudage (voir **figure 2**). Lors du soudage de l'aluminium à de l'acier, le rivet de soudage en acier est placé dans une perforation dans la tôle en aluminium. Le rivet de soudage est soudé à la tôle en acier, qui est positionnée sous la tôle d'aluminium.

Groupe 2: soudage par friction

Le groupe du soudage par friction englobe le



Fig. 1: soudage par résistance avec bande process (source: Fronius International, Allemagne) [9]

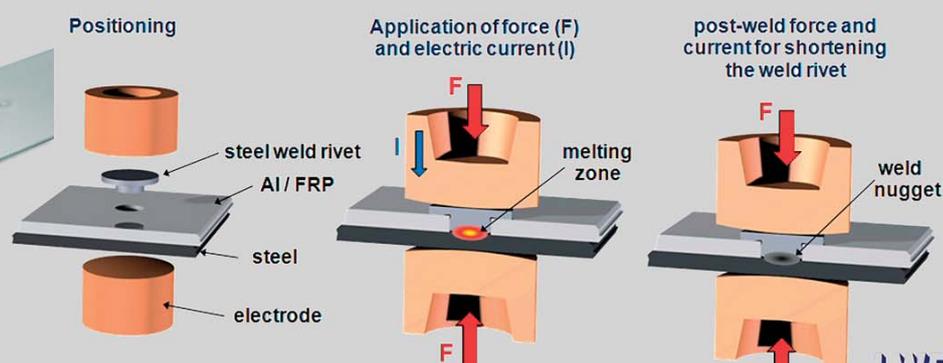


Fig. 2: soudage par résistance avec élément (source: LWF, Universität Paderborn, Allemagne) [5]

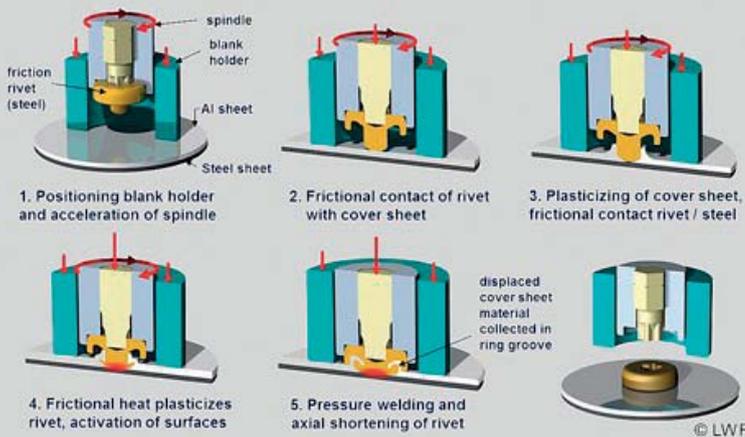


Fig. 3: soudage par friction avec élément
(source: LWF, Universiteit Paderborn, Allemagne) [5]

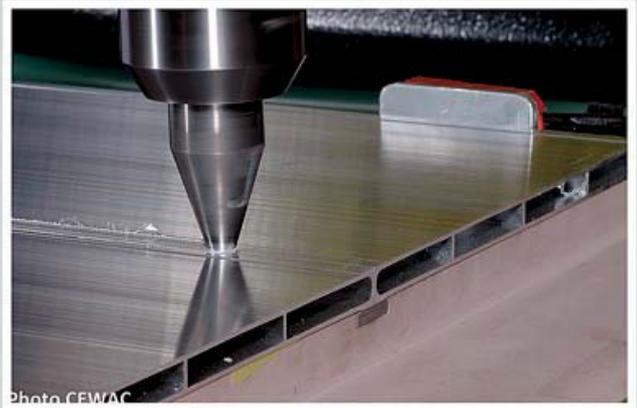


Fig. 5: soudage par friction-malaxage
(source: CEWAC, Belgique) [3]

soudage par friction avec élément, le soudage par points par friction et le soudage par friction-malaxage. Dans le cas du soudage par friction avec élément ('friction element welding'), on utilise p.ex. une petite pièce en acier. Celle-ci est soudée via friction à une autre tôle, à travers une perforation dans la tôle du dessus (voir **figure 3**). Diverses combinaisons de matériaux sont possibles, vu que le soudage par friction permet d'assembler un large éventail de matériaux dissemblables. Lors du soudage par points par friction ('refill friction stir spot welding'), une broche et un manchon (sleeve) sont mis en rotation (**figure 4**). Le manchon fait passer le matériau à l'état plastique. Il arrive dans l'espace à l'intérieur du manchon. La broche se déplace ainsi vers le haut. En cas de profondeur de pénétration suffisante, le manchon en rotation est retiré et la broche pousse le matériau plastique dans la zone de soudage pour créer l'assemblage. D'après certaines sources, il serait même possible d'assembler des composites et des matériaux non ferreux. Lors du soudage par friction-malaxage ('friction stir welding'), un outil rotatif, composé d'une broche et d'un épaulement, est poussé entre les deux tôles à souder (voir **figure 5**). Sous l'effet de la pression exercée, la broche pénètre jusqu'à l'épaulement dans le matériau et la chaleur de friction alors générée amène le matériau à l'état plastique sans qu'il ne fonde. Lorsque l'outil avance, le matériau est poussé de l'avant vers l'arrière de l'outil. Ici, l'assemblage est formé à tout moment à l'état solide. En général, les outils sont dotés d'un genre de filetage poussant le matériau du haut vers le bas. Ce procédé permet de créer des assemblages linéaires comme par points. Contrairement au soudage friction spot, il reste toutefois un creux à la fin de la soudure. Lors du soudage par friction-malaxage, les matériaux ne fondent pas. La formation de phases intermétalliques généralement néfastes peut ainsi rester

limitée. Alors que le soudage par friction avec rotation est limité par le fait qu'au moins une des pièces doit être symétrique à l'axe de rotation, le soudage par friction-malaxage permet le soudage bout à bout et à recouvrement de tôles et de profilés.

Groupe 3: soudage à l'arc

Le groupe des procédés de soudage à l'arc englobe deux variantes: le soudage au laser et le soudage à l'arc avec un élément d'assemblage. Le soudage au laser ('laser welding') comporte un certain nombre d'avantages par rapport aux procédés de soudage à l'arc conventionnels. Le procédé de soudage est ainsi bien plus rapide et l'apport de chaleur dans le matériau de base est nettement moindre. Cela donne une soudure très étroite avec une pénétration relativement profonde, jusqu'à plusieurs millimètres de profondeur et avec peu de déformation. Certains matériaux dissemblables peuvent souvent être soudés au laser directement sans matériau d'apport.

Certains procédés de soudage au laser permettent un apport de chaleur très contrôlé, ce qui offre des possibilités supplémentaires, surtout en cas de fines tôles. Pendant le soudage à l'arc avec élément ('arc element welding'), un court élément d'assemblage (l'élément) est utilisé (voir **figure 6**). Il n'y a pas de contact direct entre la tôle supérieure et la tôle inférieure, mais l'élément garantit la fixation de la tôle supérieure sur la tôle inférieure en un assemblage principalement basé sur la forme et en partie sur l'interférence. Une soudure est ainsi créée entre l'élément et la tôle inférieure.

Des variantes de cette technologie d'assemblage sont le soudage de goujons et les variantes à décharge de condensateur. Dans ce sens, l'élément d'assemblage fait aussi partie de la recherche.

Groupe 4: soudage par pression

Le soudage par impulsion électromagnétique ('electromagnetic pulse welding') fait partie du groupe des procédés de soudage par pression (voir **figure 7**).

Ces procédés permettent de réaliser un assemblage entre deux surfaces en les pressant l'une contre l'autre. Le soudage par impulsion magnétique est un procédé de soudage par pression où la déformation et l'impact se font très rapidement, comme lors du soudage par explosion. La force explosive est toutefois générée d'une manière sûre, à savoir via une bobine à induction. Ce procédé permet de réaliser des assemblages entre des métaux et des alliages très différents, difficiles à assembler avec les procédés de soudage par fusion conventionnels.

COMBINAISONS DE MATERIAUX ETUDIEES

Les combinaisons de matériaux ont été sélectionnées en étudiant les différents segments du marché. Cela a donné lieu au choix de combinaisons représentatives du secteur automobile, des applications de réfrigération, de l'électronique, de l'alimentaire, de la construction de cuves et de la technique de façade.

Combinaison de matériaux 1: aluminium & acier

- aluminium: EN-AW 5182 (AlMg_{4,5}Mn_{0,4})
Épaisseur de tôle: 2,0 mm;
- acier: MS-W1200+ ZE50/50 (HDT1200M)
Épaisseur de tôle: 1,5 mm.

Combinaison de matériaux 2: alliage non ferreux & alliage non ferreux

- aluminium: EN-AW 1050 (H14/24) – Épaisseur de tôle: 1,0 mm;

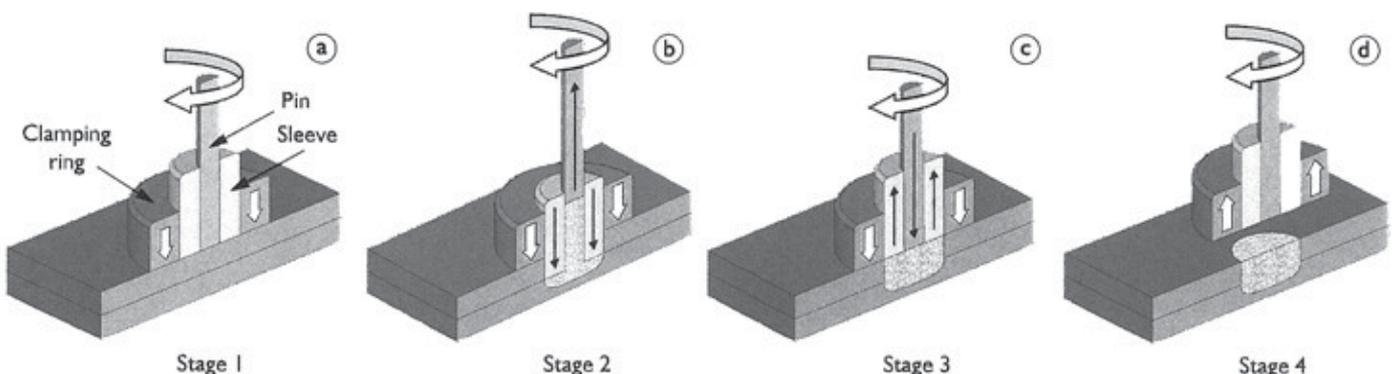


Fig. 4: soudage par points par friction (source: Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Allemagne) [6]

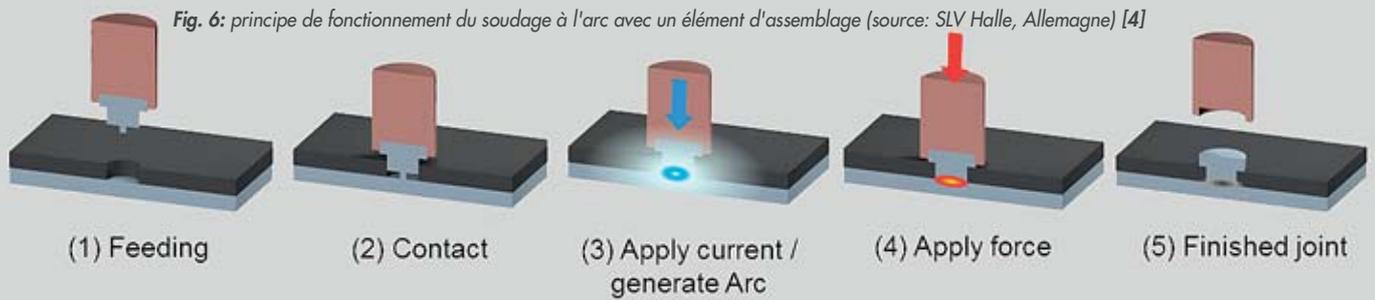


Fig. 6: principe de fonctionnement du soudage à l'arc avec un élément d'assemblage (source: SLV Halle, Allemagne) [4]

- cuivre: Cu-ETP (R240)
Épaisseur de tôle: 1,0 mm.

Combinaison de matériaux 3: acier haute résistance & acier inoxydable

- acier haute résistance: HCT780X+ZE50/50
Épaisseur de tôle: 1,5 mm;
- acier inoxydable: H800 (1.4378)
Épaisseur de tôle: 1,5 mm.

ETUDE DE FAISABILITE

Le tableau suivant présente les résultats de l'étude de faisabilité des différentes technologies d'assemblage pour les combinaisons de matériaux visées. Comme on peut le voir, tous les procédés ne convenaient pas pour le soudage de toutes les combinaisons de matériaux. Les résultats seront commentés dans les sections suivantes.

CRITERES DES TECHNOLOGIES D'ASSEMBLAGE

Sur la base des recherches expérimentales et de la caractérisation du soudage, une comparaison des différentes technologies d'assemblage a été établie, basée sur les critères 'benchmark' définis par le consortium. Des critères ont aussi été définis pour établir une comparaison entre les techniques de soudage étudiées et des techniques d'assemblage mécaniques.

Critères 'benchmark'

Les critères 'benchmark' suivants ont été utilisés pour évaluer les performances du soudage pour chaque technologie d'assemblage:

- résistance au cisaillement quasi statique;

- résistance à la traction transversale quasi statique;
- résistance au cisaillement à des vitesses de déformation élevées;
- limite de fatigue;
- résistance à la corrosion: qualification visuelle et résistance au cisaillement quasi statique après tests de corrosion.

Les conclusions suivantes ont été tirées sur la base des critères 'benchmark'.

Combinaison de matériaux 1: EN-AW 5182 (épaisseur tôle: 2,0 mm) & MS-W1200+ZE50/50 (épaisseur tôle: 1,5 mm)

- Le soudage par friction avec élément était la meilleure technologie d'assemblage, vu que les meilleures propriétés mécaniques étaient atteintes (sur le plan de la résistance au cisaillement quasi statique, de la résistance au cisaillement à des vitesses de déformation élevées et de la résistance à la traction transversale quasi statique). Ce procédé offrait la meilleure résistance à la corrosion, vu que la meilleure résistance au cisaillement après les tests de corrosion et la sensibilité la moins forte à la corrosion ont été constatées. Une inspection visuelle a révélé une forte corrosion de l'assemblage. Une coupe transversale métallographique d'un assemblage via soudage par friction avec élément est illustrée en figure 8.
- Le soudage par points par friction donnait les assemblages de la moins bonne qualité, en particulier en matière de résistance à la corrosion. On trouve un exemple d'un assemblage via soudage par points par friction et la coupe transversale métallographique correspondante sur les figures 9 et 10.

- Le soudage par points par résistance avec bande process, le soudage par résistance avec élément et le soudage à l'arc avec élément étaient considérés comme des technologies d'assemblage 'moyennes'.

Combinaison de matériaux 2: EN-AW 1050 (épaisseur de tôle: 1,0 mm) & Cu-ETP (épaisseur de tôle: 1,0 mm)

- Le soudage par impulsion électromagnétique était la meilleure technologie, vu que les meilleures propriétés mécaniques étaient atteintes (sur le plan de la résistance au cisaillement quasi statique, de la résistance au cisaillement à des vitesses de déformation élevées et de la résistance à la traction transversale quasi statique). Ce procédé offrait la meilleure résistance à la corrosion, vu que la meilleure résistance au cisaillement après les tests de corrosion et la sensibilité la moins forte à la corrosion étaient constatées. La fig. 11 montre une coupe transversale métallographique d'un assemblage entre une tôle en aluminium et une tôle en cuivre, via la technologie par impulsion électromagnétique.
- Le soudage à l'arc avec élément donnait des assemblages de la moins bonne qualité, au niveau des propriétés mécaniques comme de la résistance à la corrosion.

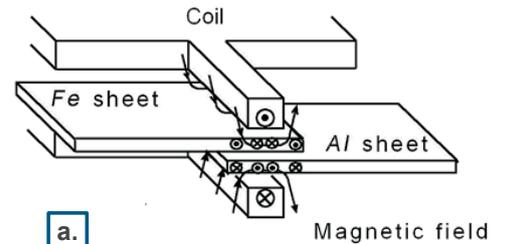


Fig. 7a et 7b: soudage par impulsion magnétique de tôles (source: [7] & PST products, Allemagne [8])

	COMBINAISON DE MATERIAUX 1: ALUMINIUM & ACIER EN-AW5182 (2,0 MM) + MS-W1200 (1,5 MM)	COMBINAISON DE MATERIAUX 2: NON-FERRO & NON-FERRO EN-AW 1050 (1,0 MM) + CU-ETP (1,0)	COMBINAISON DE MATERIAUX 3 ACIER HAUTE RESIST. & ACIER INOXYDABLE HCT600X (1,5 MM) + H800 + X(1,5 MM)
SOUDEGE RESISTANCE AVEC BANDE PROCESS (KUL)	Convient	Convient	Convient
SOUDEGE PAR RESISTANCE AVEC ELEMENT (LWF)	Convient	Convient	Convient
SOUDEGE PAR FRICTION AVEC ELEMENT (LWF)	Convient	Convient	Ne convient pas
SOUDEGE PAR POINTS PAR FRICTION (IBS)	Convient	Convient	Ne convient pas
SOUDEGE PAR FRICTION-MALAXAGE (CEWAC)	Ne convient pas	Convient	Ne convient pas
SOUDEGE AU LASER (CEWAC)	Ne convient pas	Ne convient pas	Ne convient pas
SOUDEGE A L'ARC AVEC ELEMENT (SLV)	Convient	Convient	Convient
SOUDEGE PAR IMPULSION ELECTROMAGNETIQUE	Ne convient pas	Convient	Ne convient pas

Tableau 1: aperçu des résultats de l'étude de faisabilité, par combinaison de matériaux et par technique d'assemblage

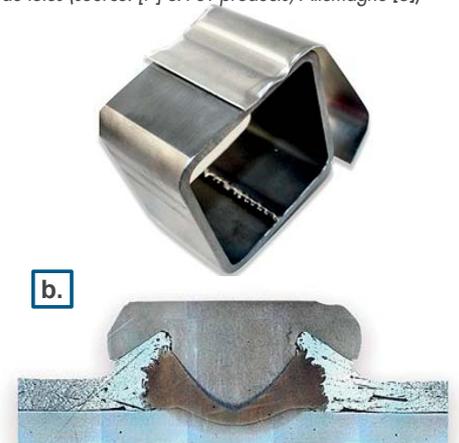


Fig. 8: coupe transversale métallographique d'un assemblage entre un alliage en aluminium et l'acier via le soudage par friction avec élément (source: EJOT EJOWELD®) [10]

Fig. 9 et 10: assemblage via soudage entre une tôle en aluminium (EN AW-6082) et une tôle en acier galvanisé (MS-W1200+ZE50/50) via le soudage par points par friction (source: Institut Belge de la Soudure) [1]

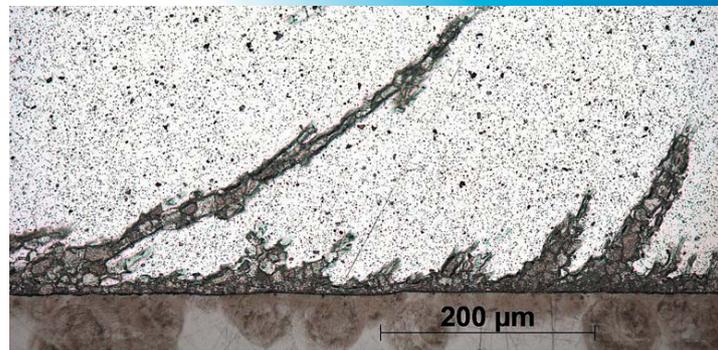


Fig. 10: coupe transversale métallographique de la fig. 9: assemblage entre une tôle en aluminium (EN AW-6082) et une tôle en acier galvanisé (MS-W1200+ZE50/50) via le soudage par points par friction (source: Institut Belge de la Soudure) [1]

- Le soudage par points par résistance avec bande process, le soudage par résistance avec élément, le soudage par friction, le soudage par points par friction et le soudage par friction avec élément étaient considérés comme des technologies d'assemblage 'moyennes'. Un exemple d'une coupe transversale métallographique d'un assemblage entre une tôle en cuivre et une tôle en aluminium via le soudage par résistance avec élément est illustré à la **figure 12**.

Combinaison de matériaux 3: HCT600X (épaisseur de tôle: 1,5 mm) & H800+ X (épaisseur de tôle: 1,5 mm)

- Le soudage par points par résistance avec bande process était la meilleure technologie d'assemblage, vu que les meilleures propriétés mécaniques étaient atteintes (sur le plan de la résistance au cisaillement quasi statique, de la résistance au cisaillement à des vitesses de déformation élevées, de la résistance à la traction transversale quasi statique et de la fatigue). La **figure 13** montre une coupe transversale métallographique d'un assemblage entre une tôle en acier haute résistance et une tôle en inox via le soudage par points par résistance avec bande process. Ce procédé présentait une plus grande sensibilité à la corrosion, par rapport au soudage à l'arc avec élément.
- Le soudage à l'arc avec élément donnait de moins bonnes propriétés mécaniques, mais ces assemblages présentaient aussi la sensibilité la moins forte à la corrosion.
- Même si le soudage au laser présentait une résistance au cisaillement quasi statique nettement meilleure par rapport aux autres technologies d'assemblage, ce procédé n'était pas applicable pour cette combinaison de matériaux en raison de la présence de fissures de solidification. Ce procédé n'a donc pas été pris en considération pour le benchmark.

RESUME

Le projet INNOJOIN a créé des opportunités pour la fabrication de composants hybrides, en validant les technologies présentées disponibles pour assembler des tôles dissemblables. Huit techniques de soudage ont été sélectionnées et réparties en quatre groupes principaux:

- soudage par résistance:** soudage par résistance avec bande process et soudage par résistance avec élément;
- soudage par friction:** soudage par friction avec élément, soudage par points par friction et soudage par friction-malaxage;
- soudage à l'arc:** soudage au laser et soudage à l'arc avec un élément d'assemblage;
- soudage par pression:** soudage par impulsion électromagnétique.

Les procédés présentés ont été étudiés d'une manière structurée pour chacune des trois combinaisons de matériaux industrielles. Pour chaque procédé d'assemblage et combinaison de matériaux, les conditions connexes, les paramètres du processus et les avantages et inconvénients ont été étudiés, à l'aide de tests destructifs comme non destructifs et d'une analyse de la corrosion. Les procédés ont, en outre, encore été développés pour adapter ainsi le procédé aux combinaisons de matériaux sélectionnées. Des connaissances systématiques et fiables ont été générées sur l'applicabilité de ces nouveaux procédés d'assemblage prometteurs pour les combinaisons de matériaux et applications industrielles. Cela a permis de comparer les différents procédés et d'établir un classement final pour chaque combinaison de matériaux, basé sur les critères 'benchmark' définis par le consortium.

Vous trouverez un résumé des principaux résultats du projet INNOJOIN ici:

http://www.bil-ibs.be/sites/default/files/INNOJOIN/innjoin_-_summary.pdf

Si cette recherche vous intéresse, vous pouvez contacter l'Institut Belge de la Soudure:

Contact: Koen Faes
09/292.14.00
Koen.Faes@bil-ibs.be

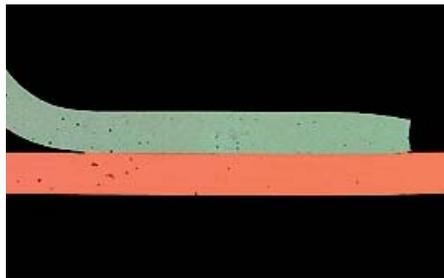


Fig. 11: coupe transversale métallographique d'un assemblage entre une tôle en aluminium (EN-AW 1050) et une tôle en cuivre (Cu-ETP), via la technologie par impulsion électromagnétique (source: Institut Belge de la Soudure) [1]

REFERENCES

- [1] Institut Belge de la Soudure, Belgique. <http://www.bil-ibs.be/recherche>
- [2] KU Leuven, campus De Nayer. <https://iiv.kuleuven.be/onderzoek/op/research/welding>
- [3] CEWAC, Belgique. Disponible en ligne: <http://www.cewac.be>
- [4] Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Halle, Allemagne. Disponible en ligne: <https://www.slv-halle.de>
- [5] Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF), Universität Paderborn, Allemagne. <https://mb.uni-paderborn.de/lwf>
- [6] Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Allemagne. <https://www.hzg.de/index.php.de>
- [7] Aizawa T., Kashani M. et Okagawa K. Application of magnetic pulse welding for aluminium alloys and SPCC steel sheet joints. Dans: Welding Research, Welding Journal. Mai 2007 (86) 119-124
- [8] PST Products, Allemagne. <http://www.pstproducts.com>
- [9] Fronius International, Allemagne. https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-E0963B62-9018FE93/fronius_international/hs.xsl/1001_ENG_HTML.htm
- [10] EJOE EJOE, Royaume-Uni. <http://www.ejot.co.uk>

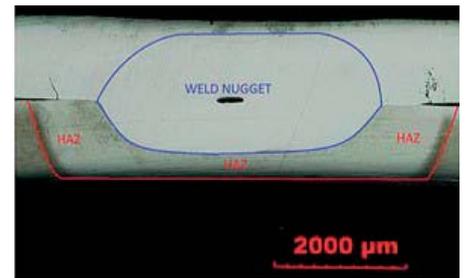


Fig. 13: coupe transversale métallographique d'un assemblage entre une tôle en acier haute résistance et une tôle en acier inoxydable, via le soudage par résistance avec bande process (source: KU Leuven, campus De Nayer, Belgique) [2]

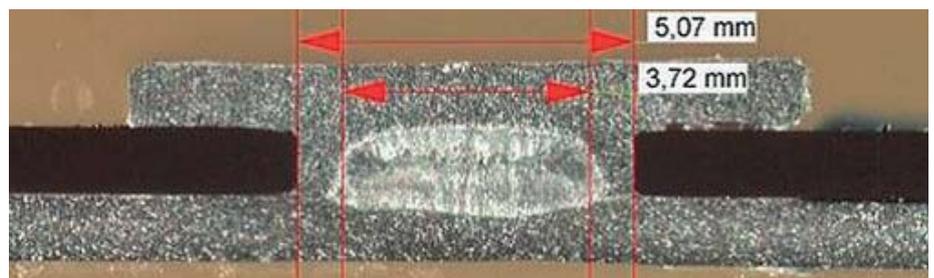


Fig. 12: soudage par résistance avec élément entre une tôle en cuivre et une tôle en aluminium (source: LWF, Universiteit Paderborn, Allemagne) [5]