

SOUDAGE PAR POINTS PAR FRICTION D'ALLIAGES D'ALU HAUTE RESISTANCE

NOUVEAU PROCÉDE DE SOUDAGE A L'ETAT SOLIDE

Le soudage par points par friction est un nouveau procédé de soudage à l'état solide, pouvant être utilisé pour les assemblages à recouvrement entre des matériaux semblables et dissemblables. Le cycle de soudage est exécuté à l'aide d'un outillage spécial, réalisant l'assemblage via la chaleur de friction et la déformation mécanique. Le résultat? Un assemblage par soudage par points, sans perte de matière, ni cratère final. Un autre avantage du procédé est le temps de soudage réduit. Il s'agit, en outre, d'un procédé écologique: il n'implique pas l'utilisation de matériaux d'apport, ni de gaz de protection, et il n'y a pas de dégagement de fumées de soudage ou de rayons IR ou UV pendant le cycle de soudage. Le procédé a été utilisé pour le soudage de l'alliage d'aluminium haute résistance EN AW-2024-T3. Différents réglages de paramètres ont été appliqués, en vue d'optimiser la qualité et les propriétés mécaniques.

Dr ir. Koen Faes, EWE

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PROCÉDE

Le soudage par points par friction est un procédé de soudage à l'état solide (le matériau reste autrement dit à l'état solide), qui convient pour les alliages à bas point de fusion, comme les alliages d'aluminium et de magnésium. Le procédé utilise un outillage spécial pour la réalisation d'un assemblage de tôles avec recouvrement.

L'outil se compose de trois parties: le pion, le manchon et la bague de serrage. Cette dernière serre les deux tôles à souder. Le manchon et le pion broche tournent dans le même sens (**figure 1a**).

Le manchon est poussé tout en tournant dans le matériau, tandis que le pion est retiré (**figure 1b**).

Cela crée un espace à l'intérieur du manchon. Le manchon amène le matériau des tôles à un état visqueux-plastique, sous l'effet de la friction entre le manchon et la tôle.

Le matériau plastique est ensuite poussé dans l'espace libéré par le pion. Une fois la profondeur de pénétration prédéfinie du manchon atteinte, il est retiré et le pion repousse le matériau plastique dans la zone de soudage, afin qu'elle soit complètement remplie (**figure 1c**). Lorsque le pion et le manchon retrouvent leur position initiale, la rotation des deux est arrêtée et tout l'outil est retiré.

Les principaux paramètres du procédé sont la vitesse de rotation, la force sur le pion et le manchon, la profondeur de pénétration et le temps de soudage. Le temps de soudage détermine surtout l'apport de chaleur, tandis que la profondeur de pénétration et la vitesse de rota-

tion sont associées aux flux de matériau dans la zone de soudage. La **figure 2** montre quelques exemples de pièces soudées. Vu les avantages du procédé, comme les bonnes propriétés de soudage mécaniques et l'absence de cratère final après le soudage, la soudabilité de différents alliages d'aluminium et de magnésium a été étudiée, ainsi que celle de combinaisons de matériaux dissemblables comme aluminium-magnésium ou aluminium-acier [1,2]. Un soudage par points par friction consiste en trois zones (**figure 3**) avec différentes microstructures: la zone affectée thermiquement, la zone affectée thermo-mécaniquement et le noyau de soudure, comme les assemblages par soudage par friction-malaxage.

Le noyau de soudure se trouve au milieu de la soudure et a environ la même largeur que le pion. Il est généralement caractérisé par une

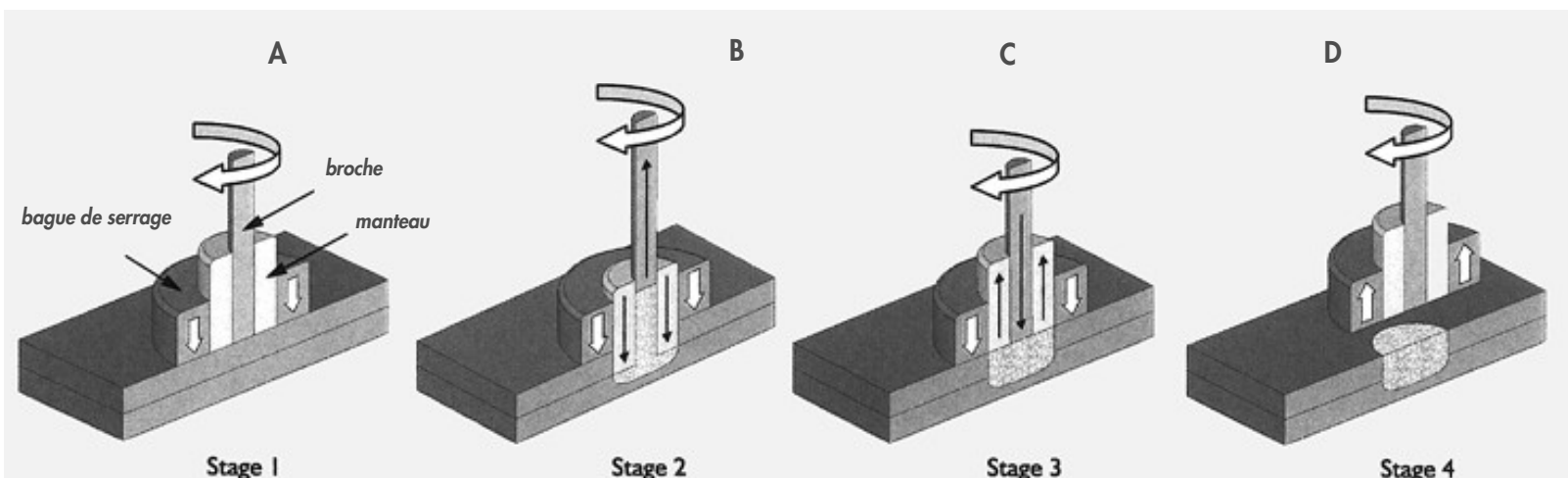


Figure 1: principe de fonctionnement du soudage par points par friction [1,2]

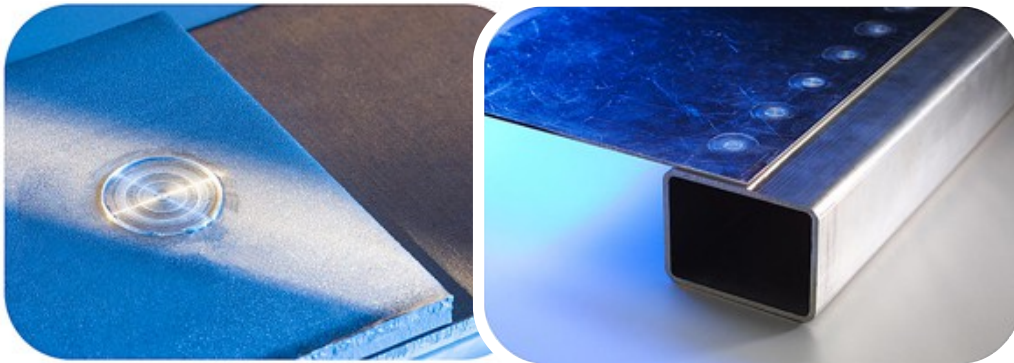


Figure 2: exemples de pièces soudées (source: Riftec GmbH)

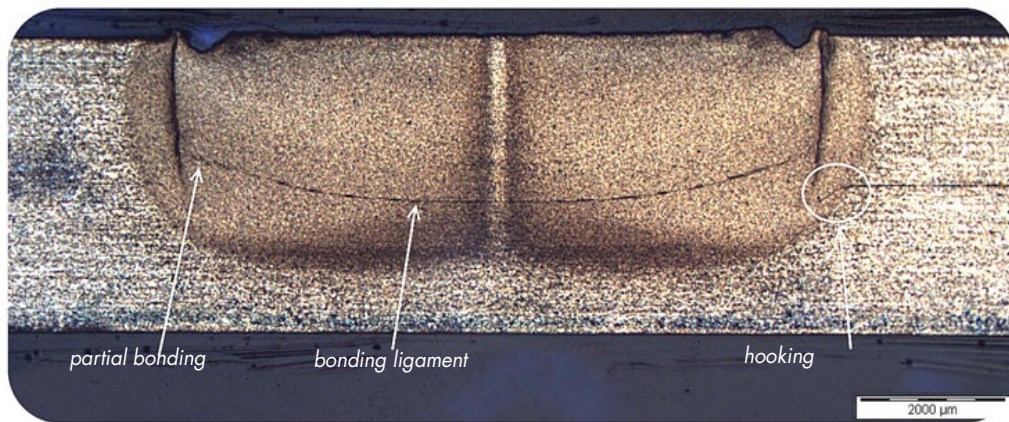


Figure 3: coupe de soudage typique dans l'aluminium EN AW-6082-T6 (épaisseur de tôle: 2 mm)

microstructure fine, résultant de la recristallisation dynamique, induite par la grande déformation plastique et le cycle thermique. Dans la zone affectée thermo-mécaniquement, on trouve une microstructure fortement déformée, formée à une température plus basse et par une déformation plastique plus limitée. La zone affectée thermiquement est caractérisée par une microstructure non déformée.

Les principaux défauts de soudage sont un remplissage incomplet de la soudure, les porosités et les défauts de liaison. Celles-ci sont dues à des paramètres de soudage inadéquats et se retrouvent généralement sur le trajet du manchon dans le matériau. Une rainure circulaire à la surface supérieure de la soudure constitue un autre défaut.

L'examen métallographique d'assemblages soudés permet de distinguer trois phénomènes, appelés dans le jargon professionnel 'hooking', 'partial bonding' et 'bonding ligament' (figure 3). Tous résultent du flux de matériau pendant le cycle de soudage.

Le hooking est une conséquence de la déformation de la surface de séparation initiale entre les deux tôles. Selon [1], cela survient pendant la pénétration et le retrait du manchon dans la tôle inférieure.

Cela joue un rôle majeur pour la solidité d'une soudure. Le bonding ligament est défini dans [3] comme la liaison entre les deux tôles sous le noyau de soudure.

Le partial bonding est décrit comme une zone de transition entre la zone de 'hooking' et le

bonding ligament. A cet endroit, la liaison entre les deux tôles est moins forte.

SOUABILITE DE L'ALUMINIUM EN AW-2024-T3

Des expériences ont été réalisées avec des tôles en aluminium EN AW-2024-T3, de 1,6 mm d'épaisseur.

La composition chimique est indiquée dans le tableau 1. Les propriétés mécaniques du matériau dans la condition T3 sont: limite d'élasticité: 345 MPa; résistance à la traction: 483 MPa et dureté: 137 HV.

Ce matériau se soude difficilement via les procédés de soudage conventionnels. Les essais de soudage ont été réalisés avec l'appareil de soudage disponible sur le marché RPS100 de la firme Harms & Wende (figure 4) [4]. L'outil avait une bague de serrage avec un diamètre extérieur de 14,5 mm. Le diamètre extérieur du manchon et du pion était respectivement de 9 et 6 mm.

ESSAIS DE SOUDAGE: VUE D'ENSEMBLE

Deux séries d'essais de soudage ont été exécutées. Dans les deux séries, le temps de soudage, la profondeur de pénétration et la vitesse de rotation ont été modifiés.

Après le soudage, une coupe transversale a été réalisée au milieu de la soudure afin d'étudier les microstructures formées.

Des essais de cisaillement avec recouvrement et des mesures de dureté (HV0,5) ont également été exécutés. Dans la deuxième série, la vitesse à laquelle l'outil pénètre et ressort du matériau, a été modifiée.

TABLEAU 1: COMPOSITION CHIMIQUE TYPIQUE DE 2024-T3^[5]

ELEMENT	% POIDS	ELEMENT	% POIDS	ELEMENT	% POIDS
AL	90,7 – 94,7	FE	max. 0,5	SI	max. 0,5
CR	max. 0,1	MG	1,2 – 1,8	TI	max. 0,15
CU	3,8 – 4,9	MN	0,3 – 0,9	ZN	max. 0,25

TABLEAU 2: VUE D'ENSEMBLE DES ESSAIS DE SOUDAGE

1E SERIE DE TESTS		2E SERIE DE TESTS	
TEMPS DE SOUDAGE (SEC.)	2-3-4-5-6-7	TEMPS SOUDAGE (SEC.)	6-8
PROFONDEUR DE PENETRATION (MM)	1,6 – 1,75 – 1,9 – 2,2 – 2,35 – 2,6	PROFONDEUR DE PENETRATION (MM)	1,6 – 1,9
VITESSE DE ROTATION (TR/MIN)	500 – 1.000 – 1.500 – 2.000 – 2.500 – 3.000	VITESSE DE ROTATION (TR/MIN)	2.500 – 3.000

Figure 4: appareil de soudage par points par friction présent à l'Institut Belge de la Soudure



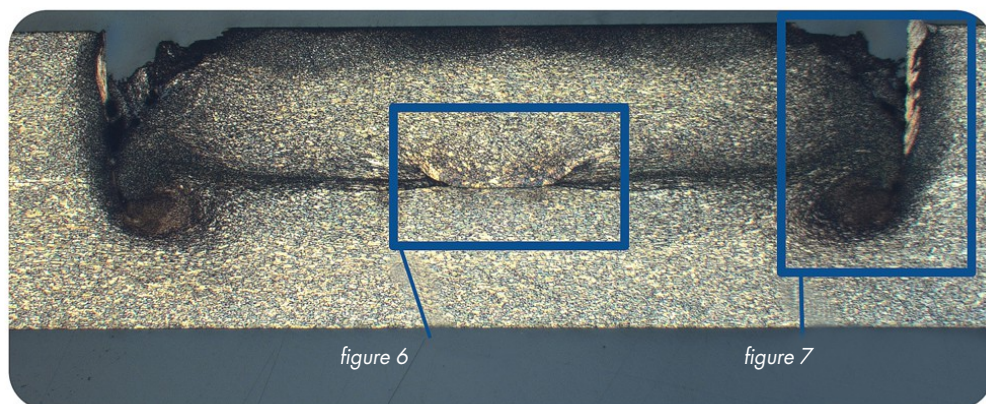


Figure 5: coupe métallographique d'un assemblage typique de la série 1 (conditions de soudage: temps de soudage: 4 sec.; profondeur de pénétration: 1,9 mm; vitesse de rotation: 1.500 tr/min)



Figure 6: détail de la figure 5: exemple de défauts de soudage (défauts de liaison, porosités et remplissage incomplet)



Figure 7: détail de la figure 5: 'bonding ligament'

SERIE DE TESTS 1

La **figure 5** illustre la microstructure d'une soudure typique de la première série de tests. Elle a été exécutée avec un temps de soudage de 4 sec., une profondeur de pénétration de 1,9 mm et une vitesse de rotation de 1.500 tr/min.

Les zones de soudage typiques sont observées: le noyau, la zone affectée thermo-mécaniquement et la zone affectée thermiquement. Dans quasiment tous les assemblages de cette série, des défauts de soudage ont été constatés: porosités, remplissage incomplet de la soudure et défauts de liaison, localisés sur le trajet du manchon, à la limite entre la zone affectée thermo-mécaniquement et la zone affectée thermiquement.

L'apparition de ces défauts de soudage est associée à une plasticité limitée de l'alliage 2024 ou à des paramètres de soudage inadaptés. Les porosités diminuaient en taille et en nombre avec une vitesse de rotation plus élevée ou un temps de soudage plus long.

Le temps de soudage joue un rôle important dans le passage en mode plastique du matériau. La présence de défauts de soudage a un impact négatif sur la qualité de la soudure, car ces défauts peuvent jouer le rôle d'amorce de fissure, si la soudure est soumise à une charge externe. La **figure 7** montre le 'bonding ligament', présent dans une telle soudure. Celui-ci avait une forme différente. On ne distinguait pas la zone marquée par le 'partial bonding' dans ces assemblages. Dans d'autres assemblages, le noyau de soudure présentait une microstructure

en bandes. Pour toutes les conditions de soudage de la série 1, des essais de traction ont été réalisés. La résistance à la traction variait entre 4 et 7,5 kN.

Aucun lien n'a pu être établi entre la résistance à la traction et la vitesse de rotation ou la profondeur de pénétration.

Une plus grande résistance à la traction a toutefois été mesurée pour un temps de soudage plus long (**figure 8**).

SERIE DE TESTS 2

On a conclu de ce qui précède, qu'une adaptation des paramètres de soudage s'imposait en vue d'améliorer les propriétés mécaniques et la qualité des soudures en général. On a conclu que les erreurs de soudage résultaient d'une plasticité trop limitée du matériau 2024 pendant le cycle de soudage.

Dans la série 2, un temps de soudage plus long et une vitesse de rotation accrue ont par conséquent été appliqués.

La vitesse à laquelle le manchon entrait dans la surface de la tôle et en était retiré, a, en outre, aussi été adaptée.

Un assemblage soudé avec des paramètres de soudage optimisés est présenté sur la **figure 9**. Ce soudage a été exécuté avec un temps de soudage de 8 sec., une profondeur de pénétration de 1,6 mm et un régime de 3.000 tr/min. Le temps de pénétration et le temps de retrait étaient tous deux de 4 sec. Comme on le voit sur la **figure 9**, la soudure est complètement remplie et il n'y a pas de défauts de soudage. Dans certains assemblages, le noyau présente une microstructure en bandes: le noyau est constitué de zones avec des microstructures en alternance à grain fin et à grain plus gros.

La **figure 10** présente le profil de dureté de deux assemblages de la série 1 et 2, exécutés avec un temps de soudage de respectivement 5 et 8 sec.

Le trait en pointillés vertical correspond à la limite entre le noyau et la zone affectée thermiquement. Une diminution importante de la dureté a été observée dans la zone affectée thermiquement. Dans le matériau de base, la dureté est de 135 - 140 HVO,5, tandis que dans la zone affectée thermiquement, elle chute à environ 115 HVO,5,

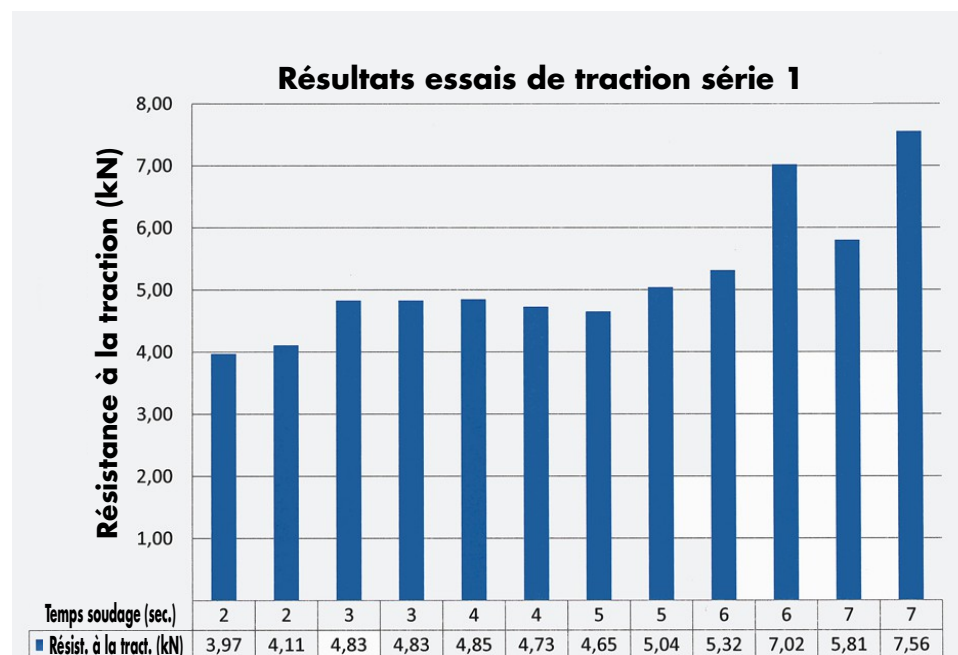


Figure 8: résultats des essais de traction pour la série 1: résistance à la traction selon le temps de soudage

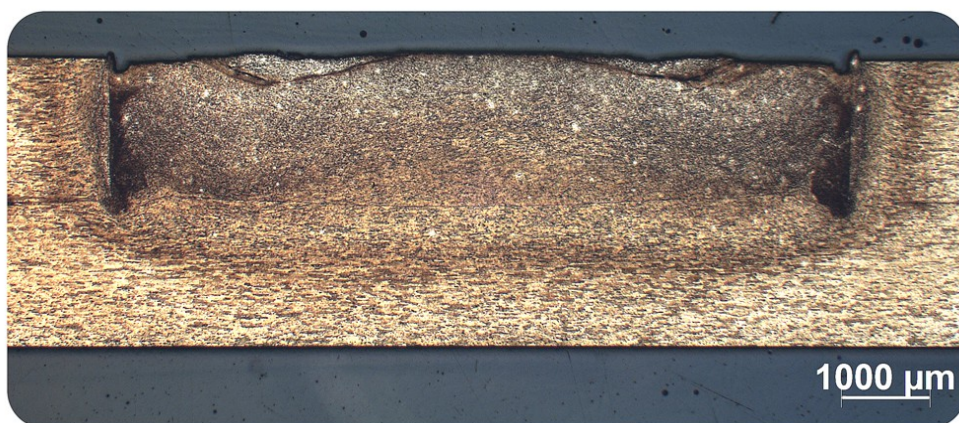


Figure 9: coupe métallographique d'un assemblage typique de la série 2 (conditions de soudage: temps de soudage: 8 sec.; profondeur de pénétration: 1,6 mm; vitesse de rotation: 3.000 tr/min)

à une certaine distance de l'interface de soudage.

Étant donné que l'alliage 2024 est un matériau durci par précipitation, la taille des précipités après le soudage détermine la dureté finale. La chute de dureté dans la zone affectée thermiquement peut être imputée au grossissement des précipités et à microstructure à la suite du cycle thermique.

Dans le noyau, la microstructure subit une déformation intense, qui, avec la température, induit une recristallisation dynamique.

La température élevée entraîne une dissolution des précipités dans la matrice et une re-précipitation pendant le refroidissement après le soudage. Dans le noyau, on observe une dureté un peu plus élevée par rapport au matériau de base. Cela peut être dû à l'affinement du grain dans cette zone et à la re-précipitation et au vieillissement après le soudage. Pour tous les assemblages de la série de tests 2, des essais de traction ont été réalisés. Sur la base des résultats des séries 1 et 2, on a constaté que la vitesse de rotation n'avait pas d'influence sur la résistance à la traction.

Celle-ci diminue toutefois pour une plus grande profondeur de pénétration du manchon. Le temps de soudage a un impact plus clair: une résistance à la traction plus élevée est mesurée pour un plus long temps de soudage. Le meilleur résultat est obtenu pour un temps de soudage de

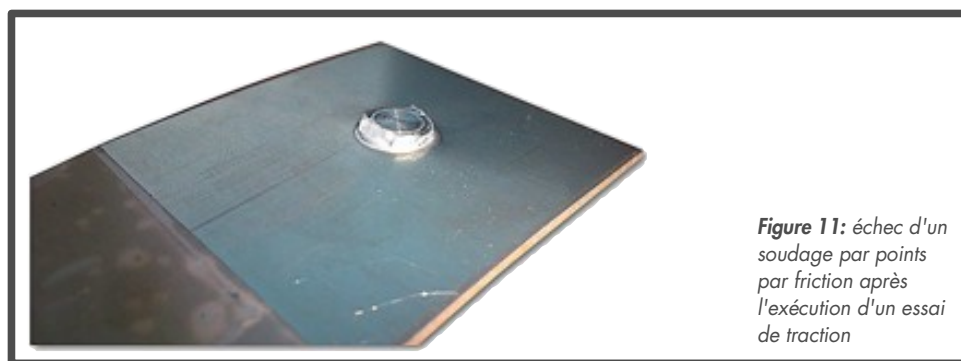


Figure 11: échec d'un soudage par points par friction après l'exécution d'un essai de traction

8 sec., une vitesse de rotation de 3.000 tr/min et une profondeur de pénétration de 1,6 mm. On note en moyenne 7,6 kN. Dans ce cas, le

remplissage incomplet. Une réduction de la dureté dans la zone affectée thermiquement a été observée, augmentant pour un temps de soudage plus long. Un traitement thermique correct peut toutefois rétablir la dureté dans la zone de soudage. Les assemblages avec des paramètres optimisés ont atteint une résistance à la traction d'une moyenne de 7,6 kN en cisaillement avec recouvrement.

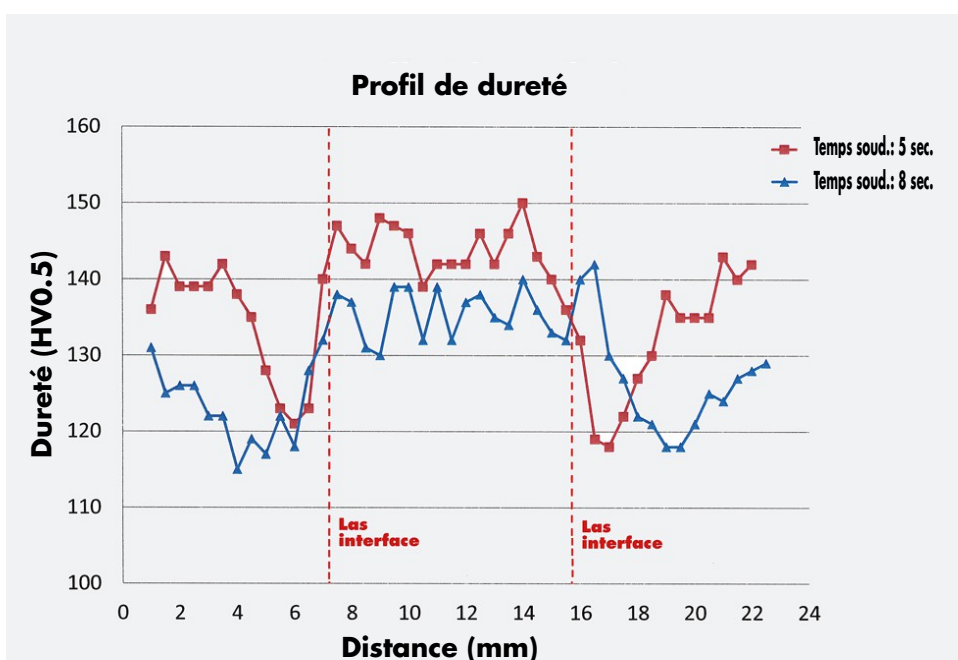


Figure 10: profil de dureté des assemblages avec un temps de soudage de respectivement 5 et 8 sec.

mécanisme de rupture est caractérisé par un détachement du noyau de la tôle supérieure (figure 11).

CONCLUSION

Pour étudier la soudabilité de l'alliage d'aluminium EN AW-2024-T3, deux séries de tests ont été exécutées. Dans la première, tous les paramètres étaient modifiés. Dans quasiment tous les assemblages, des erreurs de soudage étaient constatées. Sur la base de ces résultats, on a conclu qu'une adaptation des paramètres de soudage s'imposait pour améliorer la qualité de soudage. Un temps de soudage plus long s'est avéré plus adéquat. Dans la série 2, des essais ont ainsi été exécutés avec un temps de soudage plus long de 6 et 8 sec. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un temps de soudage de 8 sec., une vitesse de rotation de 3.000 tr/min et une profondeur de pénétration de 1,6 mm. Le temps de soudage et la vitesse de rotation accrus augmentent la plasticité du matériau dans la zone de soudage, ce qui permet d'éviter des défauts comme les défauts de liaison ou un

REFERENCES

- [1]: T. Rosendo, B. Parra, M.A.D. Tier, A.A.M. da Silva, J.F. dos Santos, T.R. Strohaecker, N.G. Alcantara, Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy. *Mater. Des.* 32 (2011) 1094.
- [2]: L.C. Campanelli, U.F.H. Suhuddin, J.F. dos Santos, N.G. Alcantara, Preliminary Investigation on Friction Spot Welding of AZ31 Magnesium Alloy. *Mater. Sci. Forum* 706-709 (2012) 3016.
- [3]: T. Rosendo, B. Parra, M.A.D. Tier, A.A.M. da Silva, J.F. dos Santos, T.R. Strohaecker, N.G. de Alcantara. Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy. *Material and Design.* 32:1094-1100.
- [4]: www.harms-wende.de
- [5]: ASM Aerospace Specification Metals - www.aerospacemetals.com