

Influence des défauts de soudage FSW sur le comportement mécanique d'un assemblage bout à bout en Cu-DHP: analyse microscopique et par corrélation d'images numériques

D. SCIRLOI^a, M. A. CONSTANTIN^d, C. BADULESCU^b
D. NEGREA^a, M. DIAKHATE^c, E. NITU^a, M. IORDACHE^a

- a. Université de Pitesti, 1, Rue Târgu din Vale, Pitești 110040, Roumanie
- b. ENSTA Bretagne, IRDL-UMR CNRS 6027, F-29200 Brest, France, claudiu.badulescu@ensta-bretagne.fr
- c. Univ. Bretagne Occidentale, IRDL-UMR CNRS 6027, F-29600 Morlaix France
- d. University Politehnica of Bucharest, Splaiul Independenței Street No. 313, Machine Building Technology Department, Romania

Résumé

Le soudage par friction-malaxage, plus connue sous son acronyme anglais FSW (Friction Stir Welding), est un procédé de soudage relativement nouveau, écologique, estimé comme la plus grande invention dans le domaine du soudage depuis 1991. Il s'adapte parfaitement à la réalisation d'assemblages de tôles en cuivre ou ses alliages, difficilement soudables avec les techniques classiques (MIG, MAG, TIG, etc). Les défauts présents dans les joints soudés par FSW réduisent drastiquement les propriétés mécaniques du joint. On identifie généralement deux catégories de défauts : (i) défauts de surface qui sont visibles à l'œil nu (sillons et bavures excessifs) et (ii) défauts à l'intérieur du joint dont la détection nécessite des efforts et moyens supplémentaires (porosités, couches d'oxyde résiduelles et manque de pénétration).

Ce travail a pour objectif la caractérisation de l'influence des défauts de soudage sur le comportement mécanique d'un assemblage bout à bout de deux tôles en Cu-DHP. Deux configurations d'assemblage soudé sont testées en traction uni axiale. Le joint de soudure, fortement hétérogène, a été investigué en s'appuyant sur la corrélation d'images numériques afin de déterminer simultanément les champs de déplacement et de déformation sur deux plans perpendiculaires : tranche et face frontale. Les résultats obtenus montrent d'une part, l'influence des paramètres de soudage sur la tenue macroscopique de l'assemblage et d'autre part, l'effet des défauts de type liaison incomplète dus aux couches d'oxydes résiduelles sur les champs cinématiques (déplacement et déformation) au voisinage du joint.

Abstract

Friction Stir Welding (FSW) is a relatively new and ecological welding process, which is considered the greatest invention in the welding field since 1991. It adapts perfectly to the realization of assemblies of copper sheets or its alloys, difficult to weld with conventional techniques (MIG, MAG, TIG, etc). The defects present in the FSW welded joints, reduce drastically the mechanical properties of the joint.

Two categories of defects are generally identified: (i) defects of surface, which are visible to the naked eye (excessive striations and flash) and (ii) defects inside the joint, the detection of which requires additional efforts and means (porosity, residual oxide layers and lack of penetration).

This work aims to characterize the influence of welding defects on the mechanical behavior of an end-to-end joint of two Cu-DHP sheets. Two welded joint configurations are tested in uniaxial tensile test. The highly heterogeneous weld joint was investigated using digital image correlation to simultaneously determine the displacement and strain fields in two perpendicular planes: lateral and frontal face. The results obtained show, on the one hand, the influence of the welding parameters on the macroscopic behavior of the assembly and, on the other hand, the effect of incomplete bond-type defects due to the residual oxide layers on the kinematic fields (displacement and strain) in the vicinity of the joint.

Mots clefs : soudage FSW, cuivre, défauts

1 Introduction

Le soudage par friction-malaxage, plus connue sous son acronyme anglais FSW (Friction Stir Welding), est un procédé de soudage relativement nouveau, écologique, estimé comme la plus grande invention dans le domaine du soudage depuis 1991. L'outil utilisé pour le FSW est constitué d'un poinçon avec épaulement et d'un pion comme représenté dans la Figure 1.

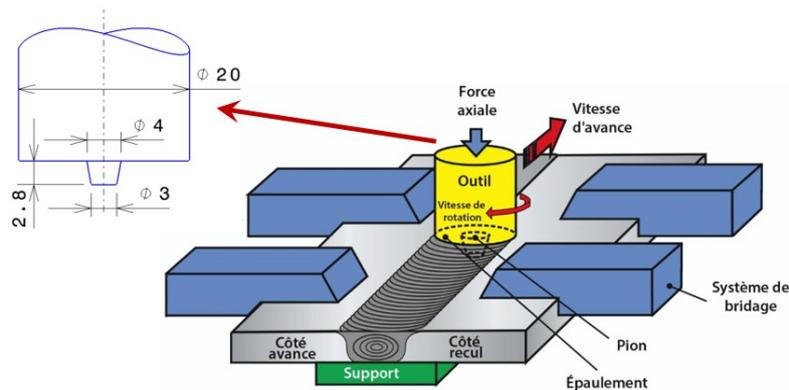


Figure 1. Illustration du procédé de soudage par friction malaxage bout à bout [1]

Lors du soudage, l'outil tourne tout en exerçant une pression sur la surface des plaques. Le frottement de l'outil avec les plaques et la déformation plastique importante du matériau fortement malaxé par l'outil, génèrent de la chaleur, ce qui cause une augmentation locale de la température des plaques (entre 0,6 et 0,8 de la température de fusion) et un ramollissement du métal [2]. Le métal ramolli des deux plaques est malaxé par l'outil pour former le joint soudé. Ce procédé permet de souder des structures en alliages d'aluminium de haute résistance, du cuivre, d'acier ou bien d'autres matériaux, qui ne pouvaient jusqu'à ce jour être assemblés que par rivetage. L'utilisation de ce procédé dans la construction des avions, naval ou nucléaire permet de réduire les coûts de fabrication et, indirectement, les coûts d'opération grâce aux allègements structurels. Le cuivre et ses alliages présentent des propriétés spécifiques très intéressantes telles une très bonne conductivité électrique et thermique, une bonne ductilité accompagnée d'une bonne résistance mécanique et à la corrosion. C'est pour cette raison que ces alliages sont utilisés dans plusieurs secteurs industriels. Parallèlement à ses avantages, les alliages à base de cuivre sont difficilement soudables par fusion en raison de leur conductivité thermique élevée et de leur vitesse d'oxydation à des températures très proches de celle de

fusion. Un moyen pour résoudre ces problèmes est le soudage par friction-malaxage qui s'adapte bien à ces matériaux [3]. La géométrie de l'outil, les paramètres du procédé ainsi que la configuration à souder jouent un rôle crucial dans l'obtention d'un joint de qualité [7]. La qualité d'un tel joint est qualifiée ici par deux paramètres : la microstructure obtenue (taille et distribution des grains) et la présence de défauts. Ces défauts du joint obtenu par FSW réduisent drastiquement ses propriétés mécaniques. Ils peuvent être divisés en deux catégories: les défauts de surface qui sont visibles à l'œil nu (sillons et bavures excessifs) et les défauts à l'intérieur du joint (cavités, couches d'oxydes résiduelles et manque de pénétration) dont leur détection nécessite l'utilisation de moyens sophistiqués. L'espacement et la hauteur des sillons dépendent du rapport vitesse d'avancement / vitesse de rotation de l'outil et de la force verticale appliquée par l'outil. Une force élevée augmente la quantité de matériau ramolli et expulsé. Les grosses bavures sur la surface du joint sont signe d'une chaleur élevée. Comme la majeure partie de la chaleur en surface est causée par le frottement entre l'épaulement de l'outil et la pièce, le contrôle de la force verticale exercée par l'outil et la vitesse de rotation aident à réduire la sévérité de ce type de défauts. Les types de défauts les plus souvent rencontrés dans l'épaisseur des joints FSW sont (i) les cavités, (ii) la liaison incomplète de type « couche d'oxyde résiduelle » et (iii) la manque de pénétration. La présence de cavités est facilement détectable par les méthodes d'inspection non destructives comme le rayon X ou par rayon gamma. Ce type de défaut est lié aux paramètres de soudage [4]. L'optimisation des vitesses de rotation et d'avancement permet d'obtenir un assemblage de meilleure qualité et d'éviter ce type de défauts. Plusieurs auteurs ont investigué les défauts de type « couches d'oxydes résiduelles », en mettant en lumière d'une part, les difficultés à détecter ces défauts par un contrôle non destructif et d'autre part l'effet de ces défauts sur les propriétés mécaniques du joint [5]. Cet article vise à caractériser l'effet d'un tel défaut sur le comportement mécanique du joint en utilisant la corrélation d'images numériques.

2 Procédure expérimentale

2.1 Obtention des échantillons

Deux plaques en Cu-DHP, de taille 250 mm x 100 mm et d'épaisseur 3 mm, sont soudées par friction malaxage (voir Figure 2-a), dans la direction du laminage avec différents jeux de paramètres du procédé (Tableau 1). La géométrie de l'outil utilisé dans cette étude est présentée sur la Figure 1.

Tableau 1

Code configuration	Vitesse de rotation [tr/min]	Vitesse d'avancement [mm/min]
Cu-12	1000	90
Cu-14	1000	150

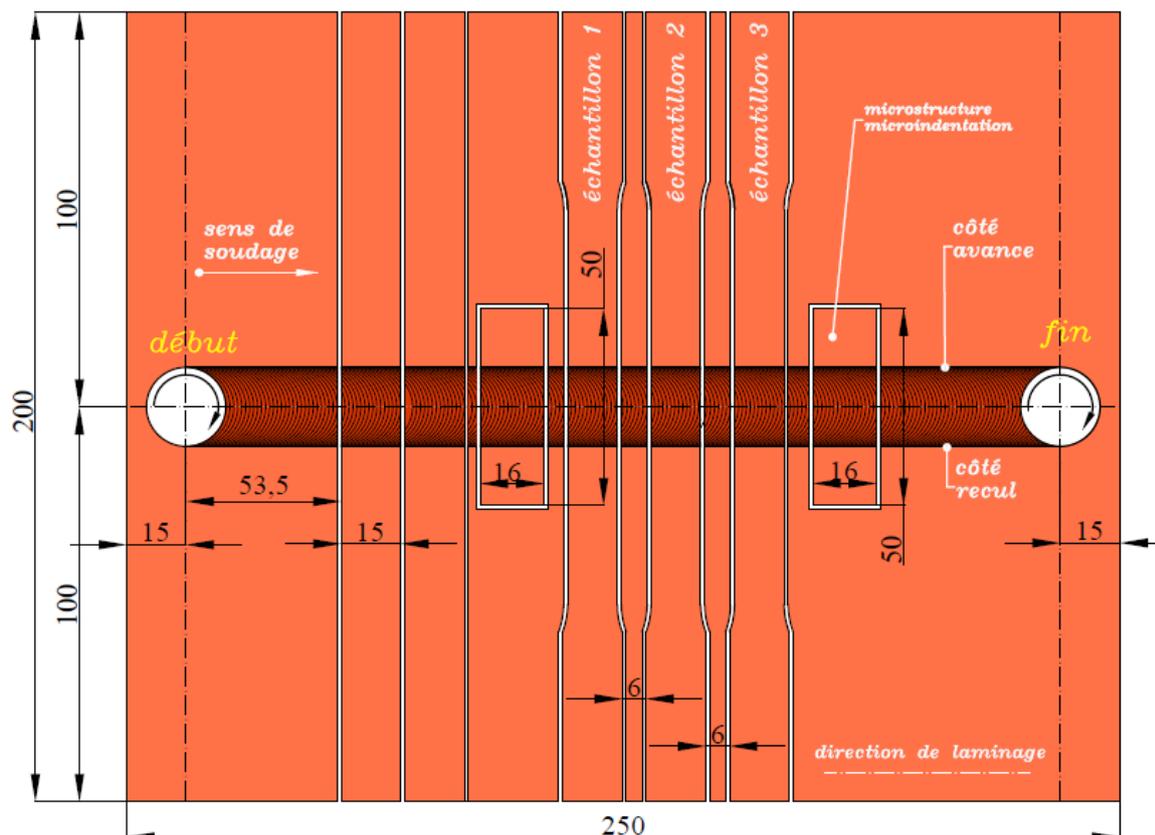
La composition chimique du matériau Cu-DHP est 99,9 % de cuivre et 0,015 à 0,04 % de phosphore (selon le fournisseur). Les propriétés mécaniques du matériau de base (avant soudure) sont reportées dans le Tableau 2. La découpe des échantillons sur les plaques soudées est schématisée en Figure 2-a. où les dimensions géométriques sont exprimées en mm. On peut constater que pour une plaque soudée, de taille 250 mm x 200 mm on obtient 3 formes géométriques d'échantillons utilisés pour : (i) la mesure de rugosité sur le joint (sillons) et des essais de flexion, (ii) la micro dureté sur la tranche et (iii) les essais mécaniques de traction. Les trois échantillons, nécessaires pour les essais de traction monotone sont découpés perpendiculairement au joint de soudure, à une distance de 95 mm par rapport au point de départ, en supposant que la stabilisation du procédé est assurée. La géométrie de ces échantillons est obtenue selon la norme SR EN ISO 6892-1 et reportée en Figure 2-b.

Tableau 2

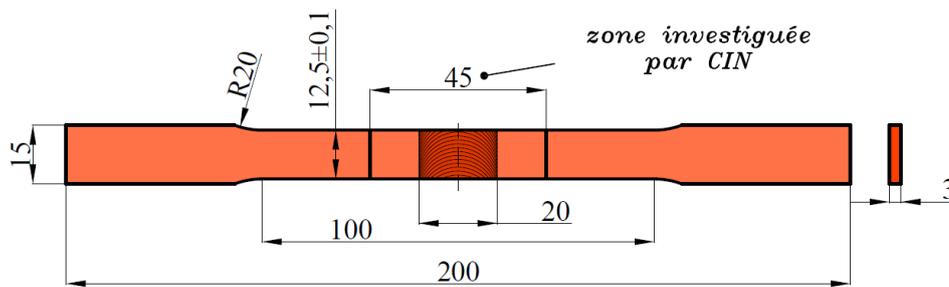
Module de Young[GPa]	132
Contrainte nominale maximale, Rm [MPa]	260
Limite d'élasticité à 0,2% de déformation plastique R _{p0,2} [MPa]	206
Dureté Vickers [HV0,3]	81
Alongement à la rupture [%]	40

2. 2 Moyens de caractérisation expérimentale

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction/compression hydraulique INSTRON 1342, avec une capacité maximale d'effort de +/- 100 kN, pilotés en déplacement avec une vitesse de la traverse de 2 mm/min (voir la Figure 3). La mesure des champs de déplacement, et par dérivation les champs de déformation, sur les deux faces perpendiculaires de l'échantillon (face frontale et face latérale) a été obtenue en utilisant deux cameras CCD simultanément (camera système GOM : taille du capteur CCD de 2448 x 2050 pixels² et Retira 6000 avec la taille du capteur CCD de 2758 x 2208 pixels²), synchronisées avec la machine de traction. Le codage aléatoire (mouchetis) a été réalisé sur les deux faces perpendiculaires, sur la zone calibrée de l'échantillon, centrée sur le joint de soudure pour une longueur de 45 mm (voir la Figure 2-b). Cette longueur a été choisie de manière à pouvoir enregistrer l'intégralité de la zone investiguée jusqu'à rupture.



a) – découpe des échantillons sur les plaques soudées(es dimensions sont en mm).



b) - géométrie de l'échantillon de traction selon la norme SR EN ISO 6892-1

Figure 2 – Géométrie et position des échantillons sur la plaque soudée par FSW

Un système d'éclairage polarisant a également été mis en place de manière à assurer un bon contraste associé aux images enregistrées par les deux caméras. La fréquence d'acquisition d'images adoptée a été de 1 Hz. La direction de sollicitation est l'axe x (voir la Figure 3) qui correspond avec la direction longitudinale de l'échantillon.

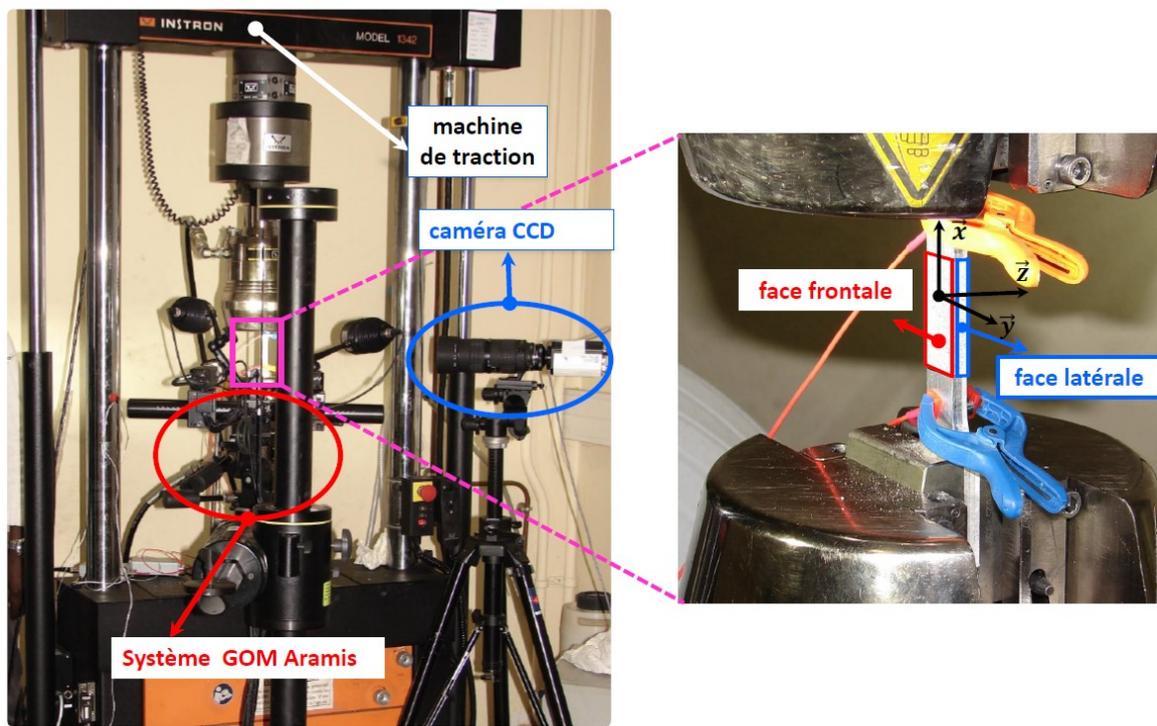


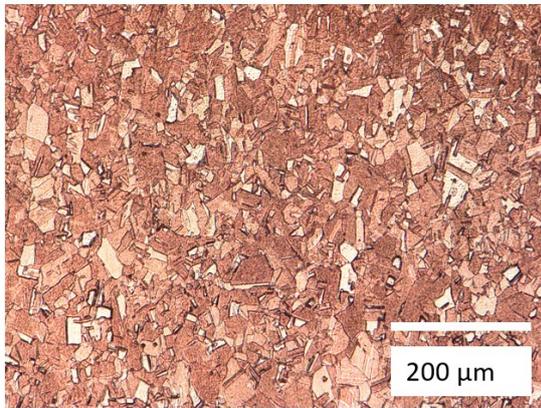
Figure 3 – Equipement expérimental pour la réalisation des essais de traction monotone

3 Résultats

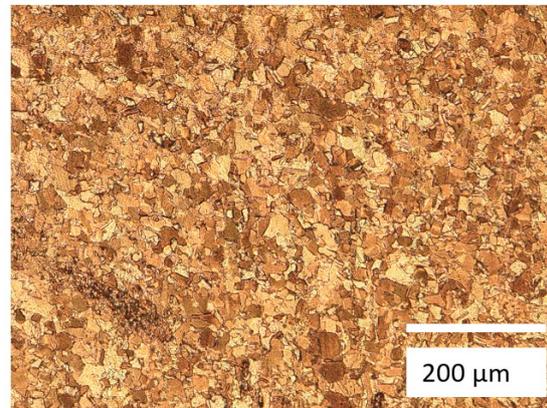
3.1 Microstructure du joint

La microstructure associée au matériau de base et au noyau, pour la configuration Cu-12 sont présentés en Figure 4. L'échantillon dédié à cette investigation a tout d'abord été soumis à un pré-polissage sur sa face latérale avec différentes granularités du papier abrasif (#600 à #1200) suivi d'un polissage diamanté avec une granularité de $3\mu\text{m}$ de manière à obtenir une surface plane et lisse. Ensuite une attaque chimique a été réalisée avec un agent réactif composé de 50% d'eau distillé et 50% de HNO_3 pendant 30 secondes, suivi d'un rinçage à l'éthanol. On peut constater que la microstructure du matériau de base (voir Figure 4-a) est plutôt régulière et polyédrique, présentant une taille moyenne des grains d'environ $24\mu\text{m}$. La microstructure du noyau (voir Figure 4-b) est moins

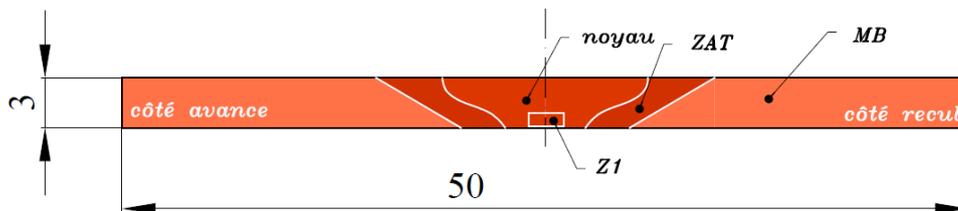
régulière, avec une taille moyenne des grains plus petite ($14\ \mu\text{m}$). On peut également constater que dans la racine du cordon (zone Z1 voir Figure 4-c) on peut observer un défaut de type couches d'oxydes (voir Figure 4-e) pour la configuration Cu -14 visible après l'attaque chimique. Par contre, on n'observe pas ce type défaut sur la configuration Cu-12 (voir Figure 4-d).



a) – microstructure pour le matériau de base



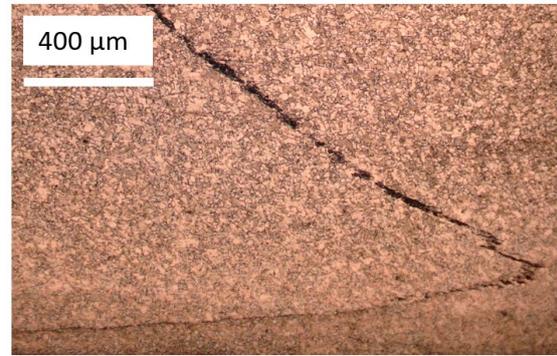
b) – microstructure pour le noyau associé à la configuration Cu - 12



c) – schematisation du joint de soudure FSW



d) – microstructure sur la zone Z1 du joint pour la configuration Cu - 12



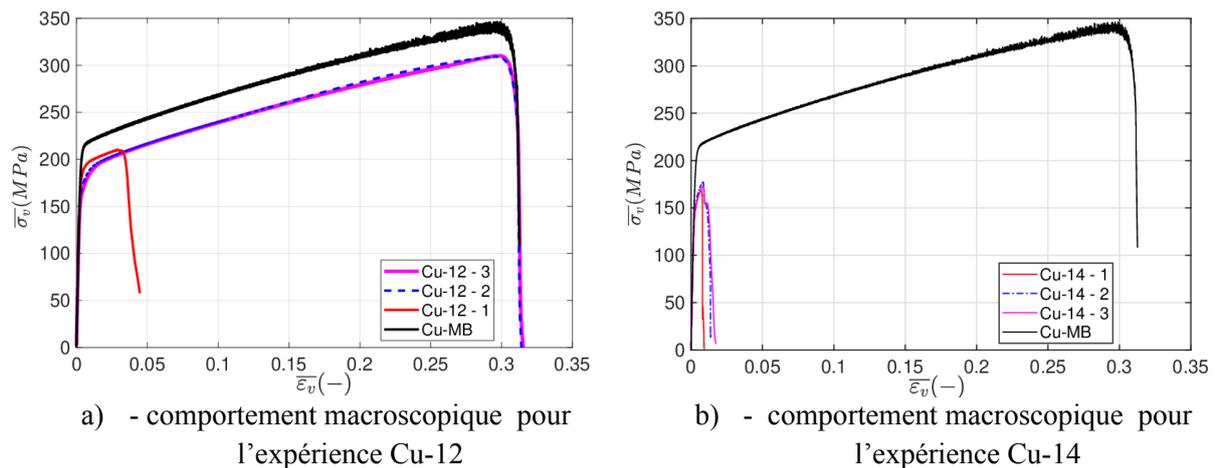
e) – microstructure sur la zone Z1 du joint pour la configuration Cu - 14

Figure 4 – microstructure du joint

3.2 Comportement macroscopique du joint

La Figure 5 représente le comportement macroscopique tracé dans les coordonnées déformation macroscopique vraie ε_v et contrainte macroscopique vraie σ_v , pour les essais sur des échantillons soudés et pour le matériau de base (Cu-MB). On peut observer dans un premier temps l'effet des paramètres du procédé (vitesse de rotation et vitesse d'avancement) sur la réponse mécanique macroscopique du joint. La contrainte maximale diminue de 9,3 % par rapport au matériau de base pour l'expérience Cu-12 et de 49 % pour Cu-14. La limite d'élasticité diminue d'environ 27 % pour le Cu-12 et de 41% pour le Cu-14. La déformation à la rupture diminue de très peu pour la configuration Cu-12 tandis que pour la configuration Cu-14 on observe une baisse très importante

d'environ 94%. On note que pour le premier échantillon de la configuration Cu-12, on retrouve une contrainte maximale très inférieure aux deux derniers. Cela s'explique par l'existence d'un défaut de type tunnel, constaté lors de l'analyse des faciès de rupture. Le seul paramètre du procédé de soudure qui a changé entre les deux configurations est la vitesse d'avancement du pion. Cela dit, pour la même vitesse de rotation mais avec presque deux fois la vitesse d'avancement du pion, on diminue d'environ 44 % la contrainte maximale à rupture. Pour tenter d'expliquer cette différence si importante entre ces deux configurations, nous allons regarder de plus près les champs cinématiques au voisinage du cordon.



a) - comportement macroscopique pour l'expérience Cu-12
 b) - comportement macroscopique pour l'expérience Cu-14
 Figure 5 - Comportement macroscopique dans le plan déformation macroscopique vraie (ϵ_v) – contrainte macroscopique vraie (σ_v) pour les expériences Cu-12 et Cu-14 ainsi que pour le matériau de base (Cu-MB)

3.3 Comportement local du joint

En Figure 6 nous avons superposé les comportements macroscopiques des derniers échantillons (fin du processus de soudage), de chaque configuration. On suppose que le processus de soudage est stabilisé pour ce dernier échantillon. Les points en bleu indiquent les niveaux de contrainte pour lesquelles les cartes de déplacement et de déformation, dans la direction de sollicitation, sont comparées. Pour obtenir ces cartes nous avons utilisé le logiciel de post-traitement GOM Aramis avec les paramètres suivants : la taille de la facette (ZOI) utilisée est de 21 pixels et le pas de décalage est égal à 19 pixels. On peut alors en déduire que la résolution spatiale en déplacement est de 21 pixels et celle de déformation de 42 pixels. Ces paramètres ont permis d'estimer que l'écart type des champs de déplacement et de déformation est égal à $0.4 \mu\text{m}$ et 5×10^{-4} , respectivement. Les champs de déplacement sur les deux faces sont reportés sur la Figure 7. Tout d'abord on peut constater la continuité du champ sur l'arrête commune aux deux faces investiguées, ce qui montre une bonne synchronisation de l'instrumentation optique. Sur la face frontale, les champs de déplacement associés aux deux configurations sont très similaires pour les niveaux de contraintes associés aux points **a**, **b** et **c**. Des différences sont observées à partir du point **d**, où les valeurs de déplacement sont plus importantes pour la configuration Cu-14.

3.4 Défauts de type couches d'oxydes

Si on regarde maintenant les champs sur la face latérale on peut constater qu'une fissure apparaisse à partir du point d pour la configuration Cu-14. Au fur et à mesure que la contrainte augmente, cette

« fissure » se propage en faisant apparaître un champ de déplacement très différent comparé à la configuration Cu-12, où on peut constater un champ continu. Cette fissure rend compte de la présence d'un défaut de soudage *de type liaison incomplète due aux couches d'oxydes*. On rappelle ici que cette nature de défaut a été observée préalablement sur la microstructure. Le trajet de propagation du défaut montre une forme en zig-zag ce qui est en bon accord avec des observations faites sur des joints de soudure FSW sur des alliages d'aluminium [5]. Il est alors possible de retrouver le trajet de la propagation si on analyse finement les cartes de déplacement pour toutes les images acquises par les cameras CCD. Comme mentionné dans l'Introduction, cette nature de défaut reste très difficilement détectable par une observation à l'œil nu et nécessite une analyse microscopique avec une préparation de la surface au préalable.

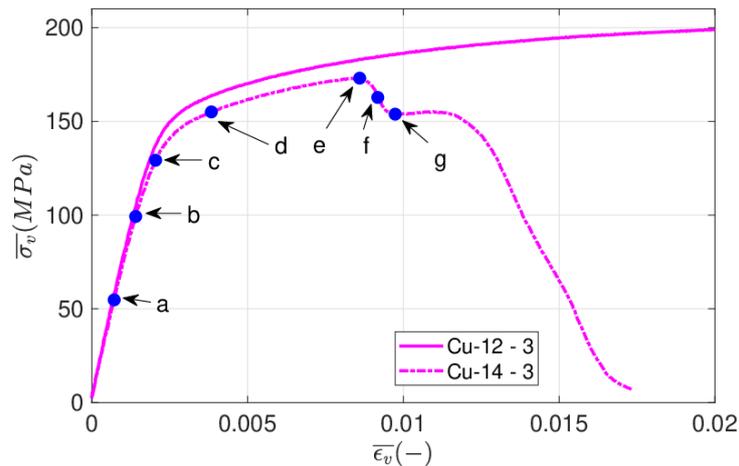


Figure 6 - Comparaison du comportement macroscopique entre le dernier essai de chaque expérience :
Cu-12 et Cu-14

La différence de comportement entre les deux configurations de joints peut être observée encore mieux sur la Figure 8, si on analyse de près les champs de déformation dans la direction de sollicitation. Sur la face latérale on constate qu'une localisation de la déformation est observée assez tôt et sous la forme « papillon », typique pour un champ de déformation autour d'une fissure. L'effet du défaut est très clairement visible sur les cartographies du champ de déformation sur la face frontale, mettant en évidence deux bandes localisées symétriquement par rapport au défaut. Que ce soit sur la face latérale ou sur la face frontale on observe une déformation hétérogène et plus importante dans le joint que sur le matériau en dehors de la zone affectée thermiquement. De plus, on constate un gradient de déformation dans l'épaisseur et également des bandes se localisent proche du centre du cordon. On en déduit finalement que ce défaut se produit vers le côté recul proche de la zone de contact entre la partie conique de l'outil et le matériau à souder. Plusieurs travaux [5, 6] ont investigué l'origine et l'effet de ce défaut pour des joints FSW réalisés sur des échantillons en aluminium. De plus les auteurs ont montré que ces défauts sont à l'origine d'une initiation prématurée et propagation des fissures dans le joint qui apparaît souvent sous la surface de contact frontal entre la surface frontale de la partie conique de l'outil et le matériau à souder. La présence de ce défaut pourrait être favorisée par une pénétration insuffisante ou par des paramètres de soudage opérationnel inappropriés pour générer la chaleur nécessaire pour amener la matière dans un état pâteux optimal. Il a également été montré que l'augmentation de l'apport de chaleur passerait les couches d'oxydes d'un film continu à des particules discrètes. Cette observation confirme les résultats de ce travail, montrant clairement une décohésion à une contrainte relativement faible proche de la zone où la couche d'oxyde pourrait être plus épaisse et continue. Cette contrainte de décohésion est plus importante dès que la fissure se propage vers la surface de contact entre l'épaulement du pion et l'échantillon, car la température augmente, et donc les couches d'oxydes sont moins denses et plutôt localisées.

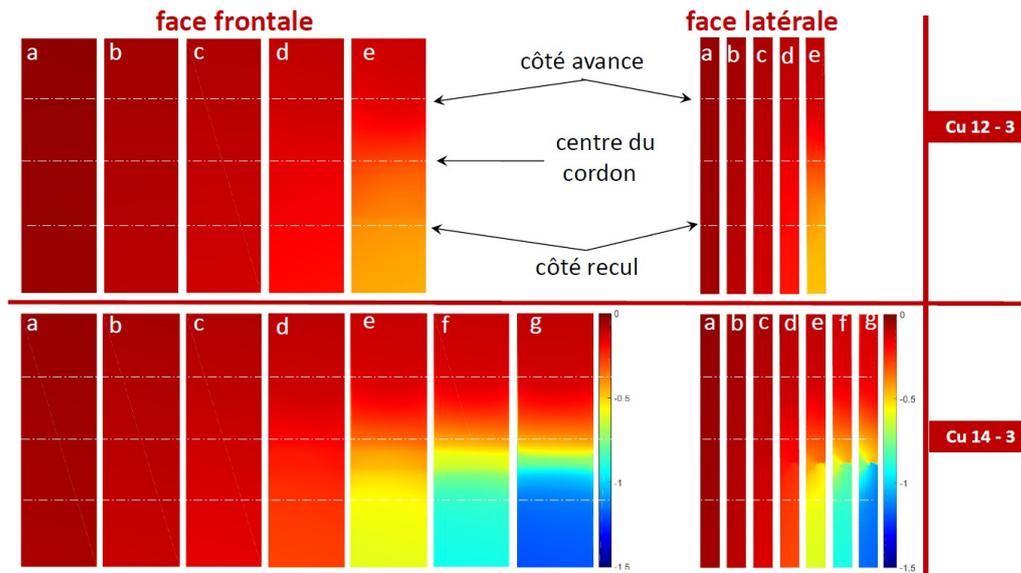


Figure 7 – Comparaison de champs de déplacement dans la direction de sollicitation ($l'axe x$) pour les configurations Cu-12 et Cu-14, sur les faces latérale et frontale

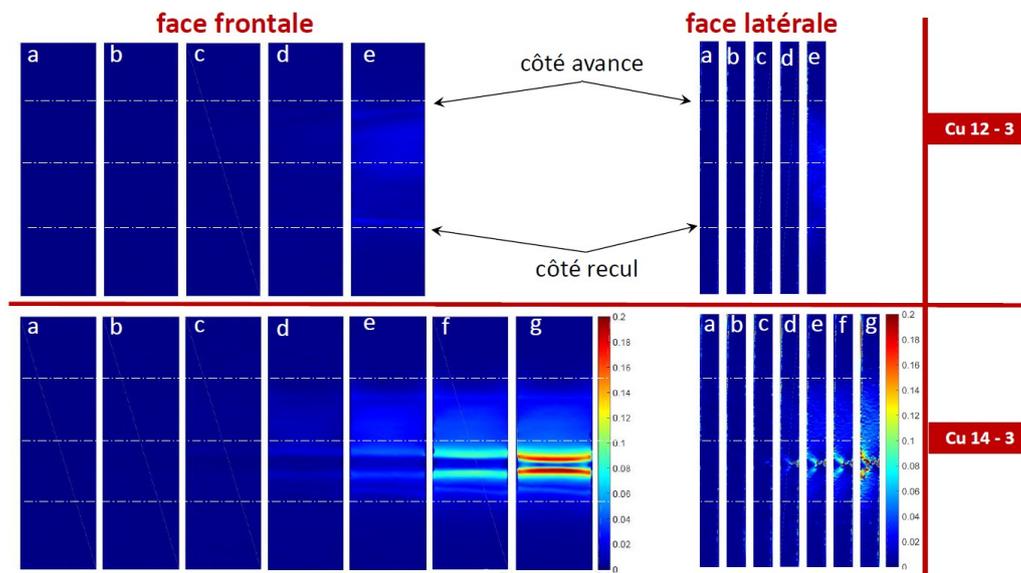


Figure 8 – Comparaison de champs de déformation logarithmiques dans la direction de sollicitation ($l'axe x$) pour les configurations Cu-12 et Cu-14, sur les faces latérale et frontale

4 Conclusion et perspectives

Dans cet article nous avons présenté une nouvelle stratégie d'identification des défauts de type couches d'oxydes en s'appuyant sur la corrélation d'images numériques sur les deux faces d'un échantillon soudé par FSW. Tout d'abord nous avons montré que les paramètres du procédé ont une influence majeure sur la présence ou l'absence de défauts de ce type. La présence d'un défaut de type couches d'oxydes est clairement visible sur le comportement macroscopique d'un échantillon en observant les deux paramètres suivants : (i) la déformation longitudinale présente une diminution forte pendant que (ii) la contrainte maximale reste bien inférieure à celle du matériau de base. Ensuite ce défaut est encore plus clairement mis en évidence à partir du champ de déplacement sur la face

latérale, permettant d'identifier l'allure dans l'épaisseur du joint ainsi que l'évolution de l'ouverture en fonction de la sollicitation mécanique. Le trajet de propagation ainsi que l'effort de cohésion pour les défauts de type couches d'oxydes reste à étudier. Il sera également intéressant de corréliser ces informations avec les faciès de rupture investigués par microscopie électronique à balayage afin d'identifier la densité et la distribution de couches d'oxydes responsables de la rupture prématurée du joint.

Acknowledgements

This work was supported by a grant of the Romanian Ministry of Research and Innovation, CCCDI-UEFISCDI, project number PN-III-P3-3.1-PM-RO-FR-2019-0048/01.07.2019

Références

- [1] <http://ceal-aluquebec.com/friction-malaxage-fsw/>
- [2] Thomas, W. M. and E. D. Nicholas, Friction stir welding for the transportation industries, *Materials & Design* 18(4-6): 269-273, 1997
- [3] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science*, Volume 53, Issue 6, 2008
- [4] Elangovan, K., V. Balasubramanian, M. Valliappan, Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 38(3): 285-295, 2008
- [5] Nan Zhou, Dongfu Song, Wenjun Qi, Xiaohui Li, Ji Zou, Moataz M. Attallah, Influence of the kissing bond on the mechanical properties and fracture behaviour of AA5083-H112 friction stir welds, *Materials Science and Engineering: A*, 719: 12-20, 2018
- [6] Martin Kadlec, Roman Růžek, Lucie Nováková, Mechanical behaviour of AA 7475 friction stir welds with the kissing bond defect, *International Journal of Fatigue*, 74: 7-19, 2015
- [7] M Iordache, C Badulescu, D Iacomì, E Nitu, C Ciuca, Numerical Simulation of the Friction Stir Welding Process Using Coupled Eulerian Lagrangian Method, *ModTech International Conference - Modern Technologies in Industrial Engineering IV*, June 15-18, 2016, Iasi, Romania IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 145 (2016)