

Etude numérique du procédé de soudage par friction malaxage

Jérôme Serri^a, Olivier Lorrain^a, Véronique Favier^a, Hamid Zahrouni^b, Mourad El Hadrouz^a,
Didier Lawrjaniec^c, Aurélien Robineau^d

^a L.P.M.M., E.N.S.A.M. Metz, 4 rue Augustin Fresnel, Technopôle, 57078 Metz

^b L.P.M.M., U.M.R. CNRS 7554, Université de Metz, Ile du Saulcy, 57045 Metz

^c INSTITUT DE SOUDURE, Espace Cormontaigne, 4 bld Becquerel, 57970 Yutz

^d INSTITUT DE SOUDURE, Zone d'activité aéroport de Metz, 2-4 rue Pilâtre de Rozier, 57420 Goin
jerome.serri@metz.ensam.fr

Résumé :

Le procédé de soudage par friction malaxage (F.S.W.) est particulièrement bien adapté pour l'assemblage d'alliages d'aluminium. La présente étude porte sur la modélisation thermo-mécanique de ce procédé et sur son implantation dans le code d'éléments finis ABAQUS/Explicit. Un état de l'art est présenté, décrivant diverses écoles traitant de l'effet thermique et mettant en évidence différentes approches basées sur une formulation lagrangienne, eulérienne ou mixte (A.L.E.). Une première modélisation du procédé pour un outil avec pion lisse est ainsi proposée. Les résultats numériques concernent aussi bien le champ de températures que les champs mécaniques au sein de la tôle à souder durant les phases transitoire et stationnaire du procédé. Cette étude a pour but de fournir à long terme un outil prédictif permettant de déterminer les paramètres de soudage à utiliser lors de la mise en œuvre du procédé.

Abstract :

Friction Stir Welding (F.S.W.) is a particularly well adapted welding process for aluminium alloys. The present study deals with the thermo-mechanical modeling of this process and its implementation in the finite element code ABAQUS/Explicit. A state of the art is presented, describing several numerical heat inputs and highlighting various approaches based on lagrangian, eulerian or mixed (A.L.E) formulation. A first model of the process is presented with a smooth pin tool. The numerical results give the temperature fields as well as the mechanical fields within the sheet during the steady and unsteady state of the process. The goal of this study is to provide a predictive model to determine the welding parameters in order to optimize the process.

Mots-clefs :

Soudage par friction malaxage (F.S.W.) ; modélisation ; Eléments Finis (E.F.)

1 Introduction

Le soudage par friction malaxage ou « Friction Stir Welding » est un procédé récent, inventé et breveté par le T.W.I. (The Welding Institute). Sans apport de matière, il consiste à brasser et mélanger localement les matériaux des deux tôles à assembler à l'aide d'un outil constitué d'un pion et d'un épaulement. Le rôle de cet outil est de provoquer la déformation plastique de la matière ainsi que son échauffement par frottement. Ainsi, le malaxage se fait à un état « pâteux ». L'avantage majeur de cette technique est de souder des matériaux sans atteindre leur température de fusion. Ainsi, les applications actuelles portent essentiellement sur les alliages d'aluminium réputés difficilement soudables par des moyens conventionnels.

Les conditions thermo-mécaniques sont très difficiles à estimer expérimentalement. La forme de l'outil et les paramètres de soudage comme la force de forgeage exercée sur l'outil, les vitesses de rotation et d'avance de l'outil influencent directement le procédé. Afin d'optimiser

les conditions de soudage pour un matériau et une épaisseur donnés, il est nécessaire d'effectuer une multitude d'essais ainsi que des caractérisations métallurgiques et mécaniques du joint soudé. L'implantation d'un modèle thermo-mécanique dans un logiciel d'éléments finis permet, pour un type d'outil et des paramètres de soudage donnés, de prédire numériquement le champ de températures et les champs mécaniques (contraintes, déformations) durant les phases transitoire et stationnaire du procédé et ainsi réduire le temps et les coûts de développement.

Pour la résolution de notre problème thermo-mécanique, notre choix s'est porté sur le logiciel ABAQUS/Explicit. Etant donné les grandes déformations engendrées par le procédé F.S.W., ce logiciel nous permet l'utilisation du remaillage adaptatif à travers une formulation de type A.L.E. (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). Notre objectif est d'analyser les possibilités offertes par ce logiciel à travers l'étude de différents aspects essentiels à la description du procédé comme la thermique, le remaillage, les lois de comportement et de frottement, et plus particulièrement, la gestion du contact à l'interface outil/tôle.

2 Modélisation du procédé de soudage F.S.W.

La modélisation de ce procédé de soudage est un problème très complexe car elle implique des couplages entre des phénomènes mécaniques, thermiques et métallurgiques. D'un point de vue thermique, des échanges de chaleur existent entre la tôle et le système de bridage avec ou sans plaque support et influencent énormément le procédé. Ces échanges de chaleur dépendent directement du type de contact choisi dans notre modélisation. C'est pourquoi il est important de bien comprendre et décrire les différents choix proposés par le logiciel concernant ce contact ainsi que tous les autres aspects comme la thermique, les grandes déformations (ou remaillage), les lois de comportement et de frottement. Ainsi, il est intéressant de dissocier chaque aspect afin d'analyser pour chacun leur influence sur le procédé de soudage F.S.W.

2.1 Description des différentes approches de la littérature

Afin de modéliser le procédé de soudage F.S.W., il existe plusieurs approches se focalisant sur des problèmes différents (échauffement, flux de matière, microstructure, contraintes résiduelles...) avec un degré d'intégration des paramètres de soudage plus ou moins avancé. Peu de détails sont donnés dans la littérature concernant la modélisation utilisée (lois de comportement et frottement) et l'implantation dans un logiciel d'éléments finis (formulation A.L.E., conditions aux limites, contact). Cependant, l'utilisation de la thermique est relativement bien gérée et détaillée par l'ensemble des auteurs. Ainsi, sa modélisation peut être décrite par différentes écoles. La première se base sur des mesures expérimentales de températures au cours du soudage afin d'en déduire un flux de chaleur à implanter dans des logiciels de calculs [Dickerson *et al.* (2003), Simar *et al.* (2004)]. De ce fait, les auteurs ne s'intéressent pas à la prédiction de la chaleur mais uniquement à son effet. Ainsi, Chao *et al.* (1999) considèrent une source de chaleur mobile représentant l'action de l'outil sur les tôles à souder. D'autres auteurs comme Xu et Deng (2003) prennent en compte le frottement afin de simuler les mouvements de matière lors du procédé de soudage F.S.W. Dans chacun des travaux, le champ de températures au sein de la tôle est bien décrit et les études permettent de prédire d'autres phénomènes physiques ayant lieu pendant le soudage notamment les contraintes résiduelles dans la tôle. La deuxième école se base sur une formulation analytique qui permet de déterminer le flux de chaleur à insérer dans le calcul. Ce flux de chaleur peut être directement lié aux conditions de soudage et permet donc d'intégrer, à un niveau supérieur à la modélisation précédente, les paramètres de soudage [Chen *et al.* (2003)]. L'outil n'est pas modélisé mais seul son effet thermique l'est. De ce fait, si les paramètres de soudage évoluent les modélisations permettent de déterminer les nouveaux champs de températures sans avoir à effectuer de

mesures supplémentaires. De plus, une corrélation entre la microstructure et les températures atteintes lors du soudage a pu être mise en évidence. De leur côté, Feng *et al.* (1998) utilisent l'équation de Rosenthal pour décrire le champ de températures en régime stationnaire dû à une source de chaleur ponctuelle se déplaçant à une vitesse constante. Song et Kovacevic (2002) proposent un modèle basé sur un système de coordonnées mobile afin de simplifier la modélisation de mouvement de l'outil. Enfin, la troisième école se base sur l'action de l'outil sur la matière où l'échauffement est directement lié dans le calcul éléments finis au frottement entre l'outil et les tôles. Ainsi la modélisation est plus complète que les précédentes puisqu'elle intègre moins de données expérimentales et plus de données géométriques comme celles de l'outil par exemple. Elle ne se contente pas de simuler l'outil par son effet mais l'intègre directement dans le calcul. Ainsi si la géométrie de l'outil change, le résultat obtenu est modifié. Schmidt *et al.* (2004) utilisent, pour modéliser l'outil, un corps rigide isotherme. De ce fait, la chaleur est générée par le frottement entre l'outil et la tôle où les conditions de contact sont très importantes. La loi de comportement retenue pour la tôle par ces auteurs est celle de Johnson-Cook. Le frottement est modélisé par une loi de Coulomb modifiée. La dissipation plastique n'est pas prise en compte. Les propriétés thermiques du matériau sont également utilisées. Le champ de températures est bien prédit et en adéquation avec les mesures expérimentales. Enfin, une corrélation entre la forme du noyau et la répartition des déformations plastiques est observable. Fourment *et al.* (2004) prédisent, à partir de deux logiciels, les champs de températures dans la tôle et dans l'outil pendant le procédé ainsi que l'écoulement de la matière. Ces auteurs ont choisi la loi de comportement de Norton-Hoff et le contact entre l'outil et la tôle est modélisé par une loi de Norton. Feulvarch (2005) se propose également de simuler, à l'aide d'un modèle éléments finis, les interactions thermo-mécaniques pendant la phase stationnaire du procédé. Il modélise ainsi les écoulements visqueux couplés aux aspects thermiques et microstructuraux et simule la source de chaleur induite dans le soudage. De son côté, Bastier (2006) modélise la phase stationnaire afin d'obtenir l'état mécanique résiduel de l'assemblage soudé à travers l'écoulement de matière et les évolutions thermiques et métallurgiques. Pour cela, l'auteur découple le problème avec un calcul thermo-hydrodynamique couplé suivi d'un calcul métal-mécanique.

Le procédé de soudage F.S.W. implique de grandes déformations au voisinage de l'outil. Il est alors indispensable d'utiliser un remaillage adaptatif décrit par une formulation de type A.L.E. où le maillage est animé d'une vitesse qui peut être différente de la vitesse d'écoulement de la matière. Ainsi, le maillage est réactualisé à chaque pas de calcul. En effet, dans le cas de la description Lagrangienne, le maillage est lié à la matière et suit les mêmes déformations que cette dernière. Ainsi, cette formulation ne permet pas de prendre en compte de grandes déformations car celles-ci entraînent une distorsion trop importante des éléments conduisant à des problèmes numériques. Cependant, elle permet de prendre en compte les échanges thermiques qui ont lieu lors du soudage et même au sein de l'outil [Dickerson *et al.* (2003)], de déterminer les contraintes résiduelles après le soudage [Chao *et al.* (1999)], les efforts sur l'outil [Chen *et al.* (2003)], la microstructure. En description Eulérienne, la matière s'écoule à l'intérieur du maillage fixe ce qui ne permet pas de prendre en compte les effets de surfaces libres. De plus, l'histoire thermique n'est pas accessible puisque le calcul est effectué en régime stationnaire. Cependant, elle présente l'intérêt de permettre de simuler l'écoulement de matière autour de l'outil [Colegrove *et al.* (2005)], ainsi que de déterminer la pression et les efforts exercés sur l'outil lors du soudage. La description A.L.E. permet ainsi de profiter d'une partie des avantages des deux formulations précédentes et d'éviter leurs inconvénients.

2.2 Modélisation retenue

Les principaux phénomènes physiques associés à ce procédé sont, d'une part, les grandes déformations observées au voisinage du pion lors de l'«arrachement» de la matière et le

frottement du pion et de l'épaulement avec la tôle, d'autre part. Ce frottement nécessite une bonne gestion du contact et des échanges thermiques dans la modélisation car son rôle est prépondérant au niveau de l'échauffement. Une méthode de pénalisation est utilisée pour la gestion du contact des surfaces Maître(outil)-Esclave(tôle). Elle tolère une pénétration de la surface esclave qui implique une force de réaction très importante afin de limiter cette

pénétration. Le frottement est caractérisé par une loi de Coulomb modifiée:
$$\begin{cases} \tau = \mu p \text{ si } \tau \leq \tau_{\max} \\ \tau = \tau_{\max} \quad \text{sinon} \end{cases}$$

où $\tau_{\max} = \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}}$ est la contrainte critique de cisaillement au dessus de laquelle la contrainte de frottement reste constante, τ est la contrainte de cisaillement, μ le coefficient de frottement et p l'effort surfacique de pression. Dans notre configuration, nous prenons l'hypothèse que 100% de l'énergie est convertie en chaleur et 80% de cette chaleur est transmise à la tôle. La loi de comportement du matériau retenue est celle de Johnson-Cook:

$$\sigma_y = \left(A + B [\bar{\epsilon}^{pl}]^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right) \quad \text{où } \sigma_y \text{ est la contrainte d'écoulement, } \bar{\epsilon}^{pl}$$

la déformation plastique équivalente, $\dot{\epsilon}^{pl}$ le taux de déformation plastique équivalent, $\dot{\epsilon}_0$ le taux de déformation plastique (1.0 s^{-1}) et A, B, C, n, T_{melt} , T_{ref} , m des constantes matériau. En effet, cette loi de comportement doit être sensible à la température et à la vitesse de déformation. De plus, elle doit prendre en compte les grandes déformations et le fait que sous l'épaulement le matériau est dans un état « pâteux » et qu'à la périphérie, son état est solide. Cette loi est généralement aussi bien utilisée dans la modélisation du procédé de soudage F.S.W. que dans le domaine de l'usinage. L'étude des lois de comportement et de frottement n'étant pas l'objectif principal de ces travaux, leur choix se justifie par les arguments précédemment cités. L'outil est modélisé par un solide 3D de type « analytical rigid » isotherme. Afin de gérer les grandes déformations, ABAQUS propose l'utilisation d'un remaillage adaptatif décrit par une formulation Lagrangienne. Celle-ci s'accompagne d'une relocalisation des nœuds à chaque pas de temps et d'un transfert de champs associé. Cette utilisation se révèle particulièrement difficile à mettre en œuvre numériquement du fait du couplage thermo-mécanique.

3 Résultats des simulations numériques

Les simulations numériques ont été effectuées à l'aide du code E.F. ABAQUS/Explicit avec des éléments volumiques à 8 nœuds tenant compte de l'aspect thermique du problème (C3D8RT). L'outil est modélisé par un épaulement de 13 mm de diamètre et un pion lisse d'un diamètre de 5 mm. La tôle, d'une épaisseur de 4 mm, est constituée d'un alliage d'aluminium 2024-T3. Ses propriétés thermiques et mécaniques ainsi que les paramètres de la loi de Johnson-Cook ont les valeurs suivantes : $E(\text{MPa})=70\,000$; $\nu=0.25$; $\rho(\text{kg.m}^{-3})=2770$; $C_p(\text{J.kg}^{-1}.\text{C}^{-1})=875$; $\lambda(\text{W.m}^{-1}.\text{C}^{-1})=237$; $A(\text{MPa})=369$; $B(\text{MPa})=684$; $n=0.73$; $C=0.0083$; $m=1.7$; $T_{melt}(\text{C})=502$; $T_{ref}(\text{C})=25$. Le coefficient de frottement entre l'outil et la tôle est pris constant, égal à 0.3. Le bord extérieur de la tôle est encastré sur toute l'épaisseur. Le pion est considéré comme étant initialement dans la tôle. Une pression de 1200 N est appliquée au pion au contact avec la tôle. Ensuite, une vitesse de rotation de 42 rad.s^{-1} est imposée au pion pendant 10 s (phase transitoire). Une bonne gestion du contact est primordiale dans notre modélisation puisque celui-ci va générer aussi bien les efforts transmis à la tôle que la chaleur induite par le frottement de l'outil sur la tôle. Dans le cas d'un contact Maître-Esclave, la surface esclave peut être définie de façon nodale ou surfacique. Une étude sur la gestion des contacts aux interfaces outil/tôle a montré que le type de contact le plus approprié pour notre procédé est celui

Surface(Maître,outil)-Nœud(Esclave,tôle) comme l'illustre la Figure 1(a). L'influence de la proportion de chaleur générée par frottement transmise à la tôle sur l'échauffement est également représentée pour un élément de la tôle situé sous l'épaulement. Dans le cas du contact nodal, la température augmente avec la proportion d'énergie transmise et une meilleure stabilisation de la température est à noter en fin de calcul. Cependant, une vérification de la valeur du coefficient de frottement a montré de meilleurs résultats à partir de simulations avec contact surfacique qu'avec contact nodal. Les résultats sur l'échauffement obtenus avec une proportion transmise de 80% (Figures 1(a) et 2) correspondent tout à fait aux observations numériques et expérimentales [Schmidt et al. (2004)] sans autres calibrages des paramètres. La Figure 2(b) montre bien la dissymétrie des déformations plastiques entre les côtés « advancing » (AS) et « retreating » (RS) conformément à l'expérience après translation du pion d'une vitesse de 0.5 m.s^{-1} (phase stationnaire). Dans les calculs présentés, la plaque support n'a pas été prise en compte afin de découpler au maximum les problèmes.

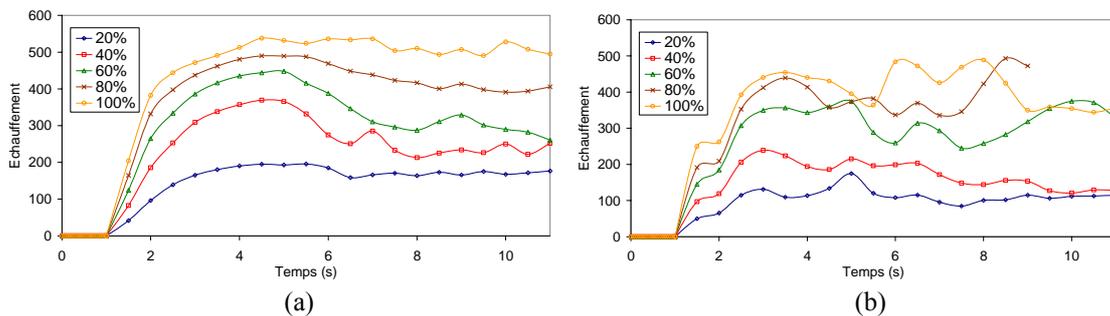


Fig. 1 – Influence de la fraction d'énergie transmise sur l'évolution de l'échauffement (°C) de la tôle dans le cas d'un contact nodal (a) et d'un contact surfacique (b).

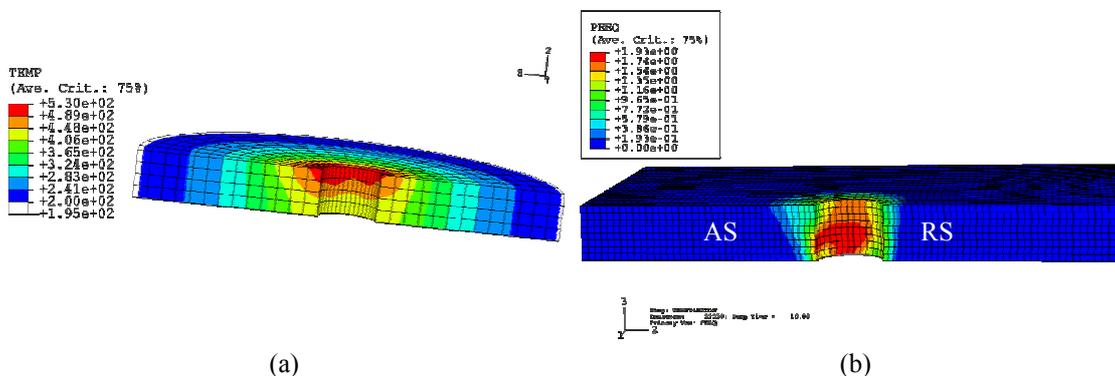


Fig. 2 – Visualisations du champ de températures avant translation du pion (a) et des déformations plastiques équivalentes après translation (b). Coupes perpendiculaires à la direction de soudage.

4 Conclusions

Suivant l'objectif à atteindre, différents types d'approches ont été mis en évidence, se différenciant par leur complexité et la prise en compte de plus ou moins de mesures expérimentales comme données d'entrée. L'implantation dans le code d'éléments finis ABAQUS/Explicit d'un modèle thermo-mécanique prenant en compte les paramètres de soudage (géométrie de l'outil, épaisseur de la plaque, vitesse de rotation, vitesse d'avance, effort de plongée, type de matériau à souder) a été réalisée. L'étude sur la gestion du contact a permis de mettre en évidence les difficultés quant au choix du type de contact. Cependant, il semblerait que pour l'échauffement, le contact nodal soit plus approprié que le contact surfacique. De plus,

les simulations numériques permettent de prédire les champs de températures ainsi que les champs mécaniques comme les déformations pour des temps de calculs acceptables d'un point de vue industriel (environ 2 heures sur un PC Core 2 Duo à 2.0 Ghz équipé de 1Go de RAM pour le calcul de la phase transitoire). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus expérimentalement. Cependant d'autres travaux, réalisés à l'aide d'un code E.F. basé sur la mécanique des fluides, sont nécessaires afin de prédire la qualité de la soudure à travers l'étude de l'écoulement de matière autour de l'outil. L'utilisation de plusieurs logiciels suivant la nature des résultats souhaités est actuellement incontournable pour traiter les différents phénomènes physiques engendrés par l'opération de soudage F.S.W. (champ de températures, déformations, contraintes résiduelles, flux de matière, ...).

Références

- Bastier, A. 2006 Modélisation du soudage d'alliages d'Aluminium par friction et malaxage. Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique, Mécanique, Matériaux.
- Chao, Y.J. & Qi, X. 1999 Heat transfert and thermomechanical analysis of friction stir joining of AA6061-T6 plates. *1st International Symposium of friction stir welding*.
- Chen, C. & Kovacevic, R. 2003 Finite element modelling of thermomechanical performance of Friction Stir Welding. *4th International Symposium on Friction Stir Welding*.
- Colegrove, P.A. & Shercliff, H.R. 2005 A 3-Dimensional CFD modelling of flow round the a threaded friction stir welding tool profile. *Journal of Materials Processing Technology*, 169, pp320-327.
- Dickerson, T., Shi, Q. & Shercliff, H.R. 2003 Heat flow into Friction Stir Welding tools. *4th International Symposium on Friction Stir Welding*.
- Feng, Z., Gould, J.E. & Linert, J.L. 1998 A heat flow model for Friction Stir Welding of aluminium alloys. *The Minerals, Metals & Materials Society*, pp. 149-158.
- Feulvarch, E. 2005 Modélisation numérique du soudage par friction-malaxage (Friction Stir Welding). Thèse de doctorat de l'Université de Saint Etienne, Génies Mécanique et Civil.
- Fourment, L., Guerdoux, S., Miles, M. & Nelson, T. 2004 Numerical simulation of the Friction Stir Welding process using both Lagrangian and Arbitrary Lagrangian Eulerian formulations. *5th International Symposium on Friction Stir Welding*.
- Schmidt, H. & Hattel, J. 2004 Modelling thermomechanical conditions at the tool/matrix interface in Friction Stir Welding. *5th International Symposium on Friction Stir Welding*.
- Simar, A., Pardoën, T. & Meester, B. 2004 Influence of Friction Stir Welding parameters on the power input and temperature distribution in aluminium alloys. *5th International Symposium on Friction Stir Welding*.
- Song, M. & Kovacevic, R. 2002 Thermal modelling of Friction Stir Welding in a moving coordinate system and its validation. *Internationnal Journal of Machine Tolls & Manufacture*, Vol 43, pp 605-615.
- Xu, S. & Deng, X. 2003 Two and three dimensionnal finite element models for the Friction Stir Welding process. *4th International Symposium on Friction Stir Welding*.