

Modélisation du procédé de soudage hybride Arc / Laser par une approche level set application aux toles d'aciers de fortes épaisseurs

A level-set approach for the modelling of hybrid arc/laser welding process application for high thickness steel sheets joining

Olivier Desmaison, Michel Bellet et Gildas Guillemot

CEMEF UMR CNRS 7635, Mines ParisTech, BP. 207, 06904 Sophia Antipolis, France

Abstract. The hybrid arc/laser welding process has been developed in order to overcome the difficulties encountered for joining high thickness steel sheets. This innovative process gathers two heat sources: an arc source developed by a MIG torch and a pre-located laser source. This coupling improves the efficiency of the process, the weld bead quality and the final deformations. The Level-Set approach for the modelling of this process enables the prediction of the weld bead development and the temperature field evolution. The simulation of the multi-passes welding of a 18MnNiMo5 steel grade is detailed and the results are compared to the experimental observations.

Résumé. Le procédé de soudage hybride Arc/Laser est une solution aux assemblages difficiles de tôles de fortes épaisseurs. Ce procédé innovant associe deux sources de chaleur : un arc électrique produit par une torche MIG et une source laser placée en amont. Ce couplage améliore le rendement du procédé, la qualité du cordon et les déformations finales. La modélisation de ce procédé par une approche Level Set permet une prédiction du développement du cordon et du champ de température associé. La simulation du soudage multi-passes d'une nuance d'acier 18MnNiMo5 est présentée ici et les résultats sont comparés aux observations expérimentales.

INTRODUCTION

Les procédés de soudage utilisés dans le monde industriel ont connu de larges développements et de profondes améliorations au cours des dernières années. Plus particulièrement, l'intérêt dans le développement des procédés de soudage de pièces de fortes épaisseurs s'est accru. Néanmoins, la réalisation, dans ce cadre, d'opérations de soudage multi-passes, conduit à l'accumulation de contraintes dommageables pour le cordon, et à l'apparition de déformations sur l'assemblage final. Le procédé de soudage hybride Arc/Laser a ainsi été proposé pour réduire les défauts associés aux différentes passes sur les propriétés finales de l'assemblage. Il consiste à déplacer une source laser en amont de la torche MIG. Cette dernière constitue la seconde source de chaleur du procédé et permet l'apport de matière. L'utilisation d'une double source de chaleur permet d'une part d'obtenir un bain de fusion plus volumineux et donc d'améliorer le rendement du procédé. D'autre part, ce procédé stimule le mélange du métal liquide dans le bain de fusion réduisant ainsi la formation de porosités dans le cordon. Afin d'améliorer la maîtrise de ce procédé innovant, sa modélisation est proposée à partir d'une approche Level Set. Cette approche s'adapte efficacement au soudage hybride puisqu'elle améliore la modélisation des contacts matière / matière, tant avec le chanfrein que lors des passes successives.

MODÈLE

Dans le cadre de l'approche Level Set (LS), un maillage éléments finis (EF) unique est construit pour l'ensemble

du système étudié (Fig. 1). Ainsi, ce même maillage est utilisé tant pour le domaine métallique que pour le domaine gazeux supérieur. L'interface métal / gaz est représentée par une fonction distance signée, $\varphi(t)$, correspondant à la distance de tout point à cette interface. L'interface s'identifie par $\varphi(t) = 0$. Les propriétés locales sont déduites de la loi de mélange :

$$\alpha = [1 - H(\varphi)]\alpha_m + H(\varphi)\alpha_g \quad (1)$$

où α est la propriété locale recherchée, et α_s et α_l ses valeurs dans les domaines métal et gaz. H est la fonction d'Heaviside lissée, évoluant continûment de 0 à 1, dans un domaine de faible épaisseur, $[-\varepsilon, +\varepsilon]$, encadrant la Level Set 0. Cette approche permet une continuité dans l'évolution des propriétés et dans la résolution des équations. Les propriétés du métal, et l'évolution de la fraction solide, proviennent du logiciel *Thermo-Calc*, en considérant un chemin de type Scheil [1].

Le champ de température T est obtenu par la résolution de l'équation de conservation de la chaleur sous la forme :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}_\theta \cdot \vec{\nabla} T \right) - \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) = Q \quad (2)$$

où ρ est la masse volumique, C_p la capacité calorifique, λ la conductivité et v_θ la vitesse locale du liquide due à l'apport de matière. La conductivité du bain est augmentée pour prendre en considération les effets des écoulements sur la distribution thermique (effets de Marangoni et de flottabilité). Q est le terme source de chaleur volumique, calculé par la détermination des sources de chaleur surfaciques dues au plasma d'arc, q_p , au laser, q_L , et aux

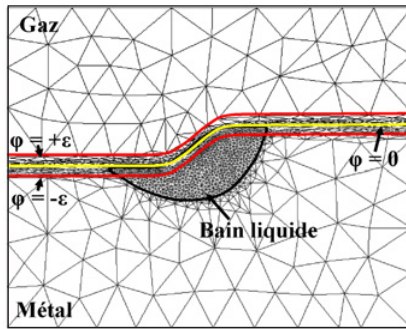


Figure 1. Maillage EF appliqué au domaine. L'interface métal/gaz ($\varphi = 0$ /courbejaune) est encadrée par le domaine de variation de H ($\varphi = \pm\varepsilon$ /courbesrouges).

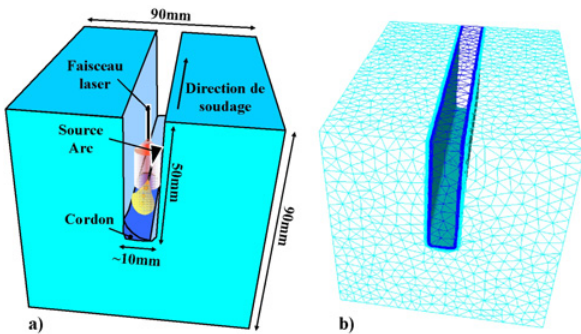


Figure 2. a) Description géométrique de la pièce soudée avec les positions respectives des sources. b) Maillage EF appliqué au système avec le domaine interfacial raffiné.

conditions de refroidissement surfacique, q_T . À ces termes, s'ajoute un terme source du aux gouttelettes alimentant le bain liquide, Q_D . L'approche *Continuum Surface Force*, (CSF) développée par Brackbill [2] permet de transformer une condition surfacique en volumique, nécessaire avec l'approche LS. Ainsi, le terme source, Q , est égal à :

$$Q = \delta(\varphi)[q_P + q_L - q_T] + Q_D \quad (3)$$

où δ est la fonction de Dirac. Le terme source des gouttelettes, Q_D , est défini dans un volume cylindrique immergé dans le bain, sous la torche MIG comme proposé par Lancaster [3], et Kumar [4]. Le détail du calcul cavitaire de Q_D est présenté par Bellet [5]. La vitesse du liquide induite par l'apport de matière, v_θ , est déterminée lors de la résolution de l'équation de conservation du moment, en régime compressible, dans le bain. Les forces considérées dans la formation du cordon sont les forces de gravité, F_g , et de tension surfacique, F_γ .

RÉSULTAT ET DISCUSSION

Le modèle proposé est utilisé pour simuler le soudage hybride multi-passes d'une tôle d'acier de nuance 18MnNiMo5, de forte épaisseur, 90 mm, chanfreinée en son milieu (Fig. 2) sur une profondeur de 50 mm.

Les vitesses des sources sont de $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, le laser étant placé 3 mm devant la torche. La puissance du laser est de 5 kW, et son rayon de 3 mm. La puissance de la

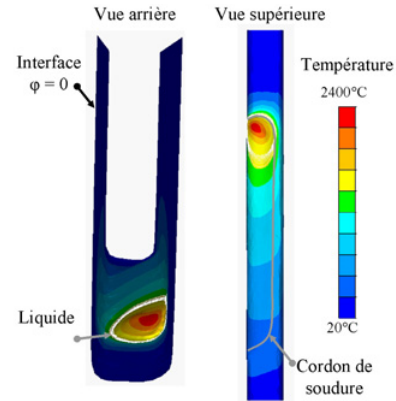


Figure 3. Champ de températures en première passe, selon deux vues, avec les géométries du cordon et du bain.

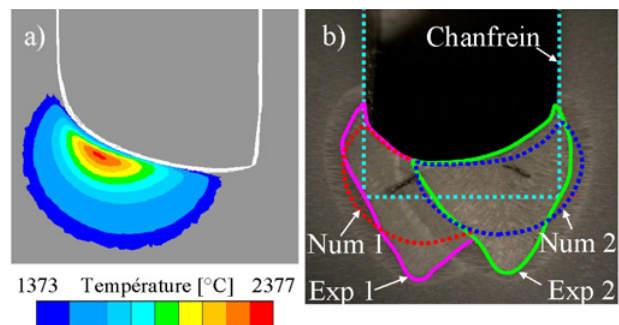


Figure 4. a) Champ de températures dans la direction transversale (1^{ère} passe). b) Géométrie du cordon pour les deux passes (Num) et observations expérimentales (Exp).

torche est de 10 kW. Elle est légèrement inclinée pour permettre la réalisation de deux passes parallèles, sous forme de couches successives. Les calculs précédents conduisent à diviser la puissance de la torche en une partie surfacique chauffant le bain (75 %), et une partie utilisée pour fondre l'électrode et créer les gouttelettes (25 %). La température extérieure est de 20°C . Le débit de matière est de $0,19 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le refroidissement interfacial est modélisé par une condition de Fourier et un rayonnement thermique. La figure 3 présente le champ de température obtenu après 6 s de soudage, lors de la première passe. Le développement du cordon est correctement modélisé, de même que le champ de température, qui décroît progressivement sur la partie arrière du cordon. Les températures du bain s'étendent du liquidus ($T_L = 1511^\circ\text{C}$) à la température considérée pour les gouttelettes ($T_D = 2200^\circ\text{C}$). La figure 4a) montre le champ de température dans une direction transversale. Le premier domaine en température correspond au domaine pâteux, du solidus, T_S , égal à 1373°C , à T_L . Le calcul a été poursuivi pour le développement de la seconde passe parallèle. La figure 4b) présente, dans la même direction, la géométrie de la zone fondue (Num 1/Num 2), superposée aux observations expérimentales (Exp 1/Exp 2).

Les dimensions des zones fondues se comparent très correctement. Les largeurs et positions de ces zones sont retrouvées. La pénétration du cordon dans le métal n'est cependant pas similaire en raison de l'absence d'un

calcul de mécanique des fluides considérant la force de Marangoni. Le développement du calcul du champ de vitesse liquide pour ce procédé est en cours, pour permettre de retrouver des profondeurs comparables. De même, le calcul des champs de contraintes et de déformations finales des assemblages est l'objectif final poursuivi par ce projet.

Les auteurs remercient l'Institut Carnot de Bourgogne, partenaire de ce projet ANR (SISHYFE / ANR-09-MAPR-0019), pour les observations expérimentales.

Références

- [1] E. Scheil, Zeit. für Metallkunde, 1942, Vol. 34, 70–72
- [2] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach, J. of Comp. Phys., 1991, Vol. 100, 335–35
- [3] J.F. Lancaster, The physics of welding, Physics in technology, 15, 1984
- [4] S. Kumar and S.C. Bhaduri, Metall. Transactions B, 1994, Vol. 25, 435–441
- [5] M. Bellet and M. Hamide, Int. J. of Num. Meth. for Heat & Fluid Flow, accepté en mai 2012, à paraître