



HAL
open science

Modélisation thermo-diffusionnelle de l'assemblage hétérogène acier/aluminium par mouillage réactif

Guillaume Sierra, Patrice Peyre, Cyril Bordreuil, Frederic Deschaux-Beaume, David Stuart, Gilles Fras

► To cite this version:

Guillaume Sierra, Patrice Peyre, Cyril Bordreuil, Frederic Deschaux-Beaume, David Stuart, et al.. Modélisation thermo-diffusionnelle de l'assemblage hétérogène acier/aluminium par mouillage réactif. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01508946

HAL Id: hal-01508946

<https://hal.science/hal-01508946v1>

Submitted on 15 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Modélisation thermo-diffusionnelle de l'assemblage hétérogène acier/aluminium par mouillage réactif

G. Sierra****, P. Peyre***, C. Bordreuil**, F. Deschaux-Beaume**, D. Stuart***, G. Fras**

* CEA/DRT/LITEN/GERAILP, 16 b avenue Prieur de la Côte d'Or, F-94114 Arcueil

sierra@iut-nimes.fr

** Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UMR 5508 CNRS, Université Montpellier II, CC 048 Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex 5

{bordreuil, deschaux, fras}@iut-nimes.fr

*** Laboratoire pour l'Application Industrielle des Lasers de Puissance, UPR 1578 CNRS, 16 b avenue Prieur de la Côte d'Or, F-94114 Arcueil

{p.peyre, dstuart}@gerailp.fr

RÉSUMÉ. Le développement d'un modèle permettant la prédiction des dimensions de la couche de réaction formée lors de l'élaboration d'assemblages acier-aluminium par mouillage réactif TIG est présenté. La croissance de la phase Fe_2Al_5 formée à l'interface est régie par les transferts de chaleur au sein de la structure générés par l'apport d'énergie du procédé TIG. Une modélisation du procédé couplée avec la loi de croissance de la phase constituant la couche de réaction permet alors de prédire l'épaisseur et la largeur de cette couche.

ABSTRACT. A numerical model allowing the prediction of the reaction layer size produced during the generation of steel-aluminium assemblies by TIG reactive wetting is developed. The Fe_2Al_5 growth produced along the interface is governed by the heat transfer in the structure caused by the welding energy deposited by the TIG process. A process modeling coupled with the growth law of the Fe_2Al_5 phase allows to predict the thickness and the width of the reaction layer.

MOTS-CLÉS : transfert de chaleur, diffusion, bi-matériaux, contact, intermétallique.

KEYWORDS : heat transfer, diffusion, bi-material, contact, intermetallics.

1. Introduction

Afin de respecter les futures normes anti-pollution visant à réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère, les constructeurs automobiles envisagent de diminuer la masse des véhicules en remplaçant certains composants en acier par de l'aluminium. Pour atteindre ce but, il est nécessaire d'envisager des liaisons hétérogènes acier-aluminium. C'est dans ce cadre qu'une étude sur l'assemblage entre des tôles d'acier galvanisé, ou non galvanisé et des tôles d'aluminium de 1 mm d'épaisseur a été réalisée par mouillage réactif (interaction entre acier solide et aluminium liquide) avec les procédés laser et TIG (Peyre *et al.*, 2007 et Sierra, 2006). La tenue mécanique de ces assemblages est en grande partie liée aux dimensions (largeur et épaisseur) de la liaison intermétallique formée entre les deux matériaux. Dans l'objectif d'optimiser la résistance de ces assemblages, le développement d'outils numériques permettant de modéliser la formation de la liaison hétérogène pourrait apporter de nouvelles solutions.

Pour l'assemblage par procédé TIG, une configuration d'assemblage par transparence est étudiée dans laquelle la fusion de l'aluminium est générée par conduction thermique à travers l'acier. Une couche de réaction intermétallique Fe₂Al₅ se développe suite à l'interaction entre l'acier solide et l'aluminium liquide, assurant ainsi la liaison entre les deux matériaux. L'étude de cette interaction en régime isotherme (Bouayad *et al.*, 2003) a permis de conclure à la croissance diffusionnelle de la phase Fe₂Al₅ et de définir une loi de croissance isotherme.

En raison de la difficulté expérimentale à mesurer les cycles thermiques à l'interface acier-aluminium qui gouvernent la croissance des phases intermétalliques, on propose de développer dans une première étape une modélisation thermique du mouillage réactif TIG pour calculer ces cycles thermiques. Les cycles thermiques sont le résultat du transfert de chaleur généré par le procédé au sein de la structure. La configuration d'assemblage utilisée, ainsi que les différents éléments du montage influencent alors fortement l'allure du cycle thermique. Afin d'assurer la transférabilité des résultats à une configuration d'assemblage différente, il est nécessaire de modéliser les échanges de chaleur entre les différents éléments de la structure (bride, tôles...) par la prise en compte des conditions d'interaction thermique entre ces éléments. Un modèle simplifié, reposant sur l'introduction de conductances thermiques de contact pour simuler les échanges de chaleur aux différentes interfaces est alors développé. Les résultats obtenus par la modélisation thermique sont validés par la mesure des cycles thermiques expérimentaux (thermocouples K) et la dimension des zones fondues (micrographies).

Dans une seconde étape, les cycles thermiques calculés à l'interface acier-aluminium sont utilisés pour modéliser la croissance diffusionnelle anisotherme de la phase Fe₂Al₅. La diffusion étant un processus thermiquement activé, il est nécessaire de calculer pour chaque température de l'interaction la constante

cinétique équivalente. Le modèle est alors validé par comparaison de l'épaisseur et de la largeur des couches de réaction calculées et mesurées expérimentalement.

2. Croissance diffusionnelle de la phase Fe₂Al₅

La mise en contact d'acier solide avec de l'aluminium liquide entraîne, en raison de la non-solubilité du fer dans l'aluminium à l'état solide la formation de phases intermétalliques Fe_xAl_y. L'étude des conditions de formation et de croissance de ces phases, réalisée dans le cadre de l'immersion d'acier solide dans de l'aluminium liquide pour des températures comprises entre 700°C et 900°C (Bouayad, 2003) a conclu à un schéma réactionnel en trois étapes, et la présence de trois mécanismes physiques : réaction chimique, diffusion et dissolution.

Durant la première étape, un contact s'établit entre les deux matériaux et se poursuit par une réaction chimique aboutissant à la formation d'une couche limite de Fe₂Al₅. La croissance de cette phase se poursuit par un processus de diffusion, ce qui constitue la deuxième étape. La troisième phase intervient avec l'apparition d'un nouveau mécanisme, simultané à la croissance diffusionnelle de la couche de réaction, qui correspond à un phénomène de dissolution des phases intermétalliques formées dans l'aluminium liquide.

Suivant ce modèle les auteurs (Bouayad *et al.*, 2003) établissent alors une loi de croissance parabolique en régime isotherme [1].

$$x = \sqrt{2kt} \text{ avec } x : \text{épaisseur de la couche (m), } t : \text{temps d'interaction (s) et } k : \text{constante cinétique de croissance (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad [1]$$

La croissance de ces couches de réaction n'induit pas de modification du régime thermique au sein de l'assemblage.

3. Conditions expérimentales du mouillage réactif acier-aluminium

L'assemblage entre des tôles (200 mm x 60 mm x 1 mm) d'acier bas carbone DC 04 (0,08 % m. C ; 0,4 % m. Mn) et d'alliage d'aluminium 6016-T4 (0,4 % m. Mg ; 1,1 % m. Si) est étudié par le procédé TIG (Tungsten Inert Gas). La fusion partielle de l'acier placé en position inférieure (Fig.1a), réalisée par soudage au plafond entraîne la fusion de l'aluminium par conduction thermique à travers l'épaisseur de la tôle.

La formation et la croissance de la phase Fe₂Al₅ se déroule ensuite dans le plan de joint entre l'acier solide et l'aluminium liquide (Fig.2a).

Afin de valider les modélisations thermiques du procédé, les essais expérimentaux sont instrumentés thermiquement avec des thermocouples K gainés (diamètre 0,5 mm et 1 mm) logés dans des trous de diamètre identique (Fig.1b) en différents points de la structure afin d'obtenir les cycles thermiques. La dimension des zones fondues (ZF) et des zones affectées thermiquement (ZAT) de l'acier et de l'aluminium est obtenue expérimentalement par analyse micrographique de coupes transverses (Fig.2a).

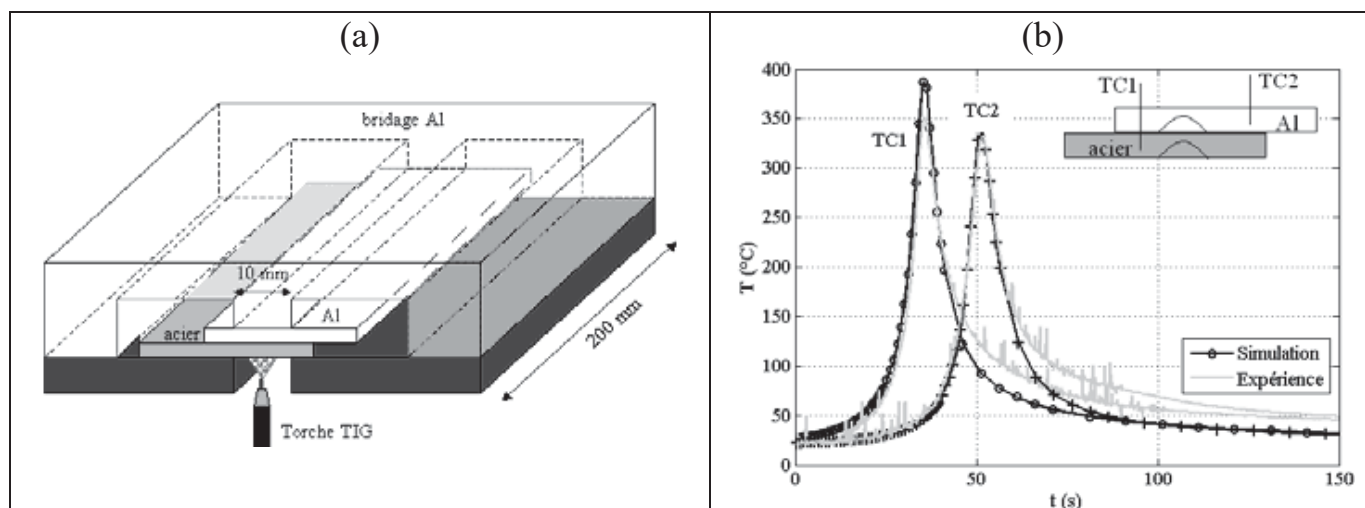


Figure 1. (a) configuration d'assemblage acier-aluminium par mouillage réactif TIG et (b) cycles thermiques expérimentaux et numériques, TC : thermocouple K

Les cycles thermiques relevés en différents points de la structure (Fig.1b) montrent une diminution des températures maximales lorsque l'on s'éloigne de la source de chaleur, depuis l'acier vers la bride. Les cycles thermiques vus à l'interface acier-aluminium sont donc fortement influencés par le transfert de chaleur au sein de la structure, et donc par la configuration d'assemblage.

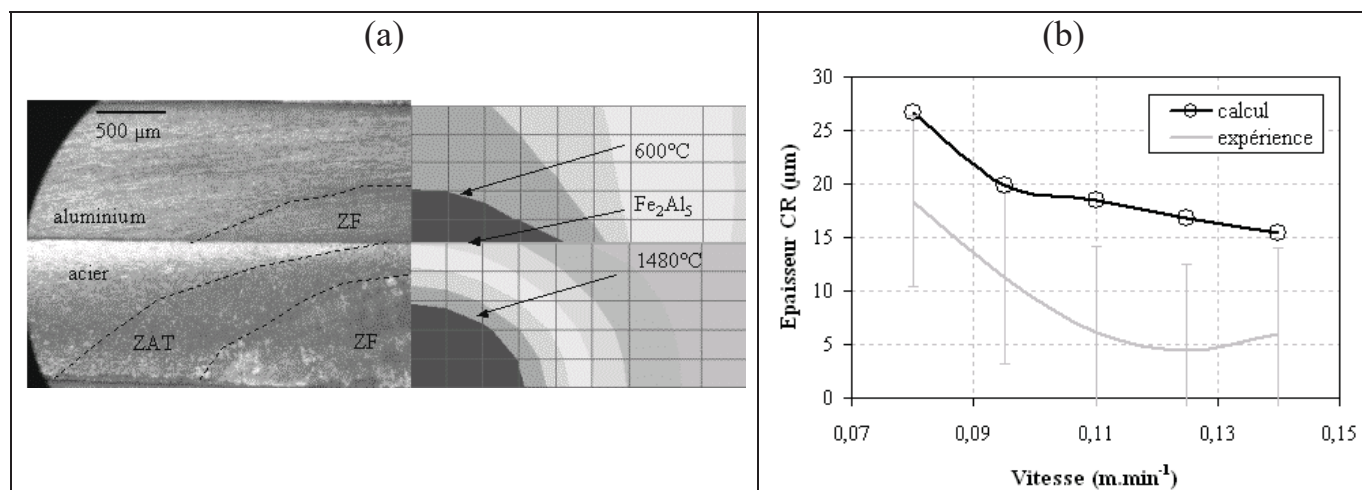


Figure 2. (a) zone de liaison expérimentale et simulée et (b) épaisseur de Fe_2Al_5 calculée et mesurée expérimentalement

Le calcul des cycles thermiques interfaciaux nécessaire au calcul diffusionnel de la croissance de Fe_2Al_5 impose alors de modéliser l'ensemble du montage expérimental et de prendre en compte les échanges thermiques et la conduction dans l'ensemble des composants de la structure.

4. Modélisation thermique

La modélisation thermique est réalisée sous SYSWELD[®] en utilisant les dimensions réelles de l'assemblage et un modèle tridimensionnel. Les paramètres dimensionnels de la source Goldak (Goldak, 1984) classiquement utilisée pour la modélisation du soudage à l'arc sont identifiés à partir de coupes micrographiques obtenues après soudage (Fig.2a).

Les conditions aux limites réalistes imposées au modèle permettent de prendre en compte les échanges de chaleur avec le milieu extérieur par convection ($h = 15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) et rayonnement ($\epsilon = 0.5$). Afin de modéliser le transfert de chaleur aux différentes interfaces, on introduit des conductances de contact (Madhusudana, 1996) en fonction de la nature de l'interaction (solide/liquide ou solide/solide) et de la nature des matériaux (acier/Al ou Al/Al).

$$Q = hA\Delta T \text{ avec } h : \text{conductance thermique (W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}), A : \text{aire de contact (m}^2) \text{ et } \Delta T : \text{écart de température entre les deux surfaces (K)} \quad [2]$$

La conductance thermique varie avec la nature des matériaux mis en contact (rugosité, dureté, conductivité thermique) et avec la pression appliquée. Le modèle simplifié développé dans cette étude considère uniquement une conductance constante fonction de l'interaction et ne prend pas en compte la pression de contact. Ces valeurs de conductance sont identifiées à partir de données bibliographiques (Madhusudana, 1996).

Le modèle numérique est ensuite validé par comparaison des tailles des zones de fusion (acier et aluminium) et des cycles thermiques mesurés en différents points de la structure. Enfin, les cycles thermiques interfaciaux sont calculés afin d'être introduits dans le calcul diffusionnel de la croissance de la phase Fe_2Al_5 .

5. Loi de croissance diffusionnelle

L'adaptation des lois de croissance isotherme de la phase Fe_2Al_5 au régime anisotherme rencontré en soudage est réalisé par le calcul de la constante cinétique pour chaque température via la loi d'Arrhénius [3].

$$k_T = k_0 \left(-\frac{Q}{RT} \right) \text{ avec } k_T : \text{ constante cinétique à la température } T \text{ (m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\text{),}$$

k_0 : facteur de fréquence, Q : énergie d'activation apparente ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$), T : température (K) et R : constante des gaz parfaits et [3]

Les valeurs de l'énergie d'activation ($Q = 122 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) et du facteur de fréquence ($k_0 = 2\cdot 10^4$) sont moyennées à partir des différentes données bibliographiques (Bouayad, 2003). Les cycles thermiques interfaciaux calculés précédemment sont alors utilisés pour calculer l'épaisseur (Fig.2b) et la largeur de la couche de réaction Fe_2Al_5 formée lors du mouillage réactif acier-aluminium.

Le modèle thermo-diffusionnel ainsi développé permet donc de modéliser avec un bon accord expérience/simulation la croissance de la phase Fe_2Al_5 à partir des paramètres de soudage et de la prise en compte de la configuration d'assemblage et des conditions d'échanges thermiques interfaciaux par l'introduction de conductance thermique de contact.

6. Conclusion

Le modèle numérique développé dans ce travail permet donc d'établir un passage direct des paramètres expérimentaux de soudage à la morphologie (épaisseur et largeur) de la couche de réaction développée lors de l'interaction acier solide-aluminium liquide. La prise en compte de la configuration d'assemblage (dimensions réelles) et des conditions aux limites (échanges avec le milieu extérieur et contact thermique aux interfaces) permet donc d'envisager le transfert de ce modèle à d'autres configurations d'assemblage afin d'optimiser, soit la géométrie de la configuration, ou de l'assemblage, soit les paramètres de soudage à partir d'un critère défini au préalable. Par exemple l'optimisation de la tenue mécanique de ces liaisons rendue possible par l'augmentation de la largeur des couches de réaction (Sierra, 2006) pourrait être réalisée par des essais numériques.

12. Bibliographie

- Bouayad A., Gerometta C., Belkebir A., Ambari A., « Kinetic interactions between solid iron and molten aluminium », *Materials Science and Engineering A*, vol. 363, 2003, p. 53-61.
 Goldak J., Chakravarti A., Bibby M., « A new finite element model for welding heat sources », *Metallurgical Transactions B*, vol. 15B, 1984, p. 299-305.

Madhusudana C.V., Thermal contact conductance, Springer, 1996.

Peyre P., Sierra G., Deschaux-Beaume F., Stuart D., Fras G., « Generation of aluminium-steel joints with laser-induced reactive wetting », *Materials Science and Engineering A*, vol. 444, n°1-2, 2007, p. 327-338.

Sierra G., Etude métallurgique et mécanique de l'assemblage hétérogène acier/aluminium par les procédés laser et TIG, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2006.