HAL
open science

Contribution numérique pour l'optimisation d'un mode opératoire de soudage – Identification d'une source de chaleur équivalente

Olivier Asserin, D. Ayrault, P. Gilles, S. Morville, E. Guyot, J. Schroeder

To cite this version:

Olivier Asserin, D. Ayrault, P. Gilles, S. Morville, E. Guyot, et al.. Contribution numérique pour l'optimisation d'un mode opératoire de soudage – Identification d'une source de chaleur équivalente. Matériaux et Techniques, 2014, 102 (4), pp.409. 10.1051/mattech/2014038 . cea-02282428

HAL Id: cea-02282428

https://cea.hal.science/cea-02282428v1

Submitted on 11 Dec 2023

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.

Matériaux & Techniques **102**, 409 (2014)
© EDP Sciences, 2014
DOI: 10.1051/mattech/2014038
www.mattech-journal.org

Matériaux & Techniques

Contribution numérique pour l'optimisation d'un mode opératoire de soudage – Identification d'une source de chaleur équivalente

O. Asserin[1], D. Ayrault[1], P. Gilles[2], S. Morville[3], E. Guyot[3] et J. Schroeder[4]

Reçu le 19 juin 2014, accepté le 22 octobre 2014

Résumé – L'utilisation d'un chanfrein étroit pour le soudage de composants lourds tels que ceux utilisés dans l'industrie nucléaire et particulièrement par AREVA, requiert la maîtrise de plusieurs paramètres et plus spécifiquement du retrait. La prédiction par la simulation numérique peut alors s'avérer utile pour la définition de modes opératoires de soudage. Le principal objectif de cette étude est d'identifier par méthode inverse les paramètres d'un modèle thermique 3D pour une configuration de soudage MAG multipasse en chanfrein étroit profond sur un acier bas carbone. La simulation de la géométrie des zones fondues ainsi que du champ de température dans le métal solide passe par l'optimisation d'un problème multiobjectif. L'optimisation du modèle numérique se base sur des résultats expérimentaux obtenus grâce à une instrumentation fine réalisée sur une maquette de soudage. Le modèle de source de chaleur 3D retenu après optimisation est une combinaison de deux sources de chaleur volumiques. Ce modèle peut alors être utilisé comme chargement pour des analyses thermiques, thermo-métallurgiques ou thermomécaniques, notamment pour la prédiction des retraits.

Mots clés : Soudage chanfrein étroit / simulation procédé MAG / optimisation paramètres / source de chaleur équivalente / transfert de chaleur

Abstract – The use of narrow gap for thick component welding as applied in nuclear industries and especially by AREVA NP, requires the mastering of several parameters and especially shrinkage. The prediction through numerical simulation is very helpful for welding procedure definition. This paper describes an approach used to determine a 3D heat source dedicated to a new industrial welding process configuration (deep narrow groove multipass low-carbon steel gas metal arc welding (GMAW), two pass per layer) to assess the groove shrinkage which occurs during welding by numerical simulation. The revelant bead shape and temperatures in the solid zone are identified by optimazing a multiobjective problem. The optimization is performed with experimental datas from fine temperature measurements on the welding mock-up. Finally, the identified 3D heat source model is a combination of two volumetric heat sources. It can be used as thermal loading for subsequent thermal metallurgical mechanical calculations, notably for shrinkage prediction.

Key words: Narrow gap TIG welding / numerical simulation / heat source / heat transfer / inverse heat conduction problem

1 Introduction

Les composants nucléaires requièrent des soudures d'une qualité parfaite et reproductible. De plus, et pour un procédé de soudage donné, la productivité exigée conduit à réduire le volume de métal déposé et cela en remplissant des chanfreins étroits. Avec ce type de géométrie, la définition de la géométrie initiale est une étape très importante et le retrait qui intervient durant le remplissage doit alors être anticipé. Afin de faciliter le choix du design et des paramètres opératoires de soudage, AREVA NP a développé un outil numérique dédié

[1] CEA, DEN, DANS, DM2S, 91191 Gif-sur-Yvette, France
[2] AREVA NP (CORP/RD), Tour AREVA, 1 place Jean Millier, 92084 La Défense Paris, France
[3] AREVA NP (ACF), BP 112, 6 allée Jean Perrin, 71200 Le Creusot, France
simon.morville@areva.com
[4] AREVA NP (EQOTC), BP 40001 Saint Marcel, 71328 Chalon-sur-Saôn, France

capable de prédire le retrait en cours de remplissage avec maillage automatique, calcul thermo-métallurgique puis mécanique (TMM). Cet outil a été validé pour le procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gas) en configuration chanfrein étroit [1]. L'objectif est ici d'identifier, par méthode inverse, un modèle thermique 3D pour le procédé MAG (Metal Active Gas) en configuration chanfrein étroit en plusieurs passes par couche pour un acier ferritique type 16MND5. Il est alors crucial de déterminer un chargement thermique adapté qui permette une simulation TMM satisfaisante et ce particulièrement pour prédire le retrait.

La méthode est basée sur une approche couplant l'expérience et la simulation. En considérant une configuration spécifique (paramètres de soudage, géométrie), le transfert de chaleur dans la pièce est modélisé à partir d'une source de chaleur équivalente. Il s'agit d'une distribution de chaleur basée sur un modèle mathématique dont les paramètres sont identifiés en résolvant un problème thermique inverse et qui consiste à minimiser l'écart entre le calcul et l'expérience. Les grandeurs observables sont les températures à proximité de la zone fondue et les dimensions du bain liquide. Dans la partie qui suit, la maquette à souder, l'instrumentation thermique et le système d'acquisition des profils sont introduits.

2 Dispositif expérimental et moyens d'analyse

La maquette est usinée dans un bloc d'acier type 16MND5 de dimensions $600 \times 350 \times 90$ mm^3. Cette nuance est représentative des matériaux utilisés pour les cuves sous pression dans l'industrie nucléaire. La largeur du chanfrein est de 12 mm en face externe, la profondeur de 80 mm, et inclut une ouverture de 1°. Le bloc a été découpé afin d'instrumenter deux faces de 27 thermocouples chacune (Fig. 1). Des tiges longitudinales ont été ajoutées pour assurer la continuité du bloc après réassemblage et des ponts de bridage assurent la rigidité de la maquette. Des thermocouples de type K avec un diamètre de fils de 50 μm ont été utilisés pour le temps de réponse très court. Chacun d'eux est soudé par décharge capacitive dans un trou de 0,6 mm de diamètre et 1 mm de profondeur, orienté selon l'axe de soudage et face à la direction d'avance. La position des thermocouples a été définie par rapport au chanfrein après différents essais préliminaires et une procédure d'optimisation d'expérience [2].

Une carte SCXI permet l'acquisition en température à une fréquence de 500 Hz. Une carte PXI, échantillonnée à 10 kHz, récupère les paramètres électriques de tension et d'intensité (les paramètres opératoires sont donnés dans le Tab. 1).

Un profilomètre laser DLS 200 Metavision® est utilisé pour relever le profil de chaque passe de soudage, durant le retour chariot (Fig. 2). Un algorithme spécifique développé par AREVA NP permet de cumuler les profils et ainsi d'en reconstruire la géométrie afin

Fig. 1. Bloc de la maquette instrumentée en thermocouple (avant réassemblage) [2].

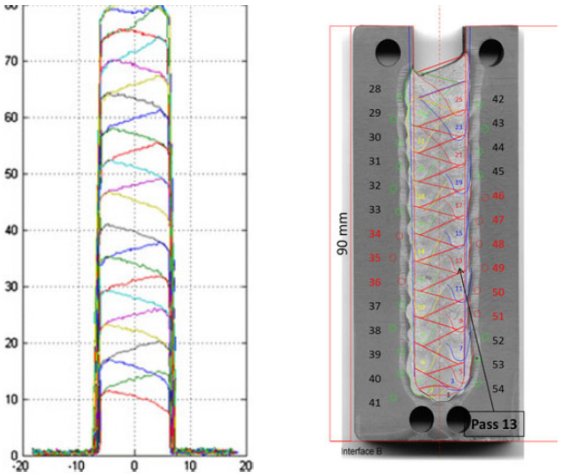

Fig. 2. Cumul des profils scannés après chaque passe de soudage ; Superposition sur la macrographie réelle de la position des thermocouples, des sections des cordons et des profils de chaque passe de soudage [2].

d'évaluer l'épaisseur des passes, leur forme et leur surface. Ces données serviront directement à la construction du maillage du modèle développé pour simuler le procédé.

Après soudage, des analyses macrographiques ont permis d'évaluer la forme des zones fondues solidifiées et de localiser précisément chaque thermocouple (phase importante avant le calibrage de la source de chaleur). La position des thermocouples, la section des cordons et leur profil sont illustrés par la figure 2. Les thermocouples ont mesuré des températures jusqu'à 1000 °C, ce qui est très satisfaisant pour le calibrage. Les données ont ensuite été rééchantillonnées, recalées temporellement et les signaux n'excédant pas 300 °C ont été écartés du processus de calibration.

3 Simulation numérique et repère mobile

La partie numérique de cette étude a été traitée avec le logiciel par éléments finis WProcess développé par le CEA-Saclay (code Cast3M [4] et plate-forme Salomé [5]). L'objectif de cet outil est à terme de proposer une simulation directe et prédictive des procédés de soudage à partir d'une simulation multiphysique couplant l'arc électrique

Tableau 1. Paramètres opératoires du soudage de la maquette avec le procédé MAG.

Courant électrique (A)	Tension (V)	Vitesse de soudage (cm.min^{-1})	Vitesse fil (m.min^{-1})
300	30	35	12

et le bain liquide. Dans ce travail, une approche simplifiée est privilégiée afin de ne pas modéliser les phénomènes physiques complexes (plasma, thermique, écoulements). Elle consiste à décrire le transfert de chaleur à partir d'une source de chaleur équivalente appliquée dans le volume de la pièce, et qui permet de retrouver la même géométrie de zone fondue et le même champ thermique dans le métal de base. La source équivalente est décrite par un modèle mathématique de distribution volumique qui repose sur des paramètres inconnus et qui seront estimés en résolvant un problème inverse de transfert de chaleur conductif à partir des données expérimentales (forme de zone fondue et thermocouples).

Le modèle thermique est résolu dans un système de coordonnées mobiles attaché à la torche de soudage. L'hypothèse d'un régime de transfert quasi-stationnaire est faite, ce qui implique que les dimensions du bain liquide et le champ thermique dans le solide sont constants. Cette méthode permet d'optimiser la taille du domaine de calcul 3D et les temps de calculs. Le champ de température est calculé à partir de l'équation suivante :

$$\rho\left(T\right)C\left(T\right)\boldsymbol{u}\boldsymbol{\nabla}T=\lambda\left(T\right)\Delta T+q_0 \tag{1}$$

avec ρ la masse volumique en kg.m^{-3}, C la chaleur spécifique en J.kg^{-1}.K^{-1}, T la température en K, u la vitesse de soudage en m.s^{-1}, λ la conductivité thermique en W.m^{-1}.K^{-1} et q_0 la densité de chaleur volumique apparente en W.m^{-3}. Différentes conditions aux limites sont appliquées de manière à imposer la température de préchauffage et des pertes convecto-radiatives sur les faces endroit, envers et latérales de la pièce ; l'enthalpie de changement de phase solide/liquide est prise en compte dans la chaleur spécifique.

De précédents travaux ont montré qu'en chanfrein étroit profond et avec un procédé de soudage TIG multipasse, le transfert de chaleur peut être correctement décrit avec une distribution énergétique de type double ellipsoïde de Goldak [3] uniquement en considérant le transfert thermique conductif. La relation mathématique de la source de chaleur est la suivante :

$$\begin{aligned}
q_f\left(x,y,z\right)&=Qf_f\frac{6\sqrt{3}}{abc_f\pi^{3/2}}\exp\left(-3\left[\left(\frac{x}{c_f}\right)^2+\left(\frac{y}{a}\right)^2\right.\right.\\
&\left.\left.+\left(\frac{z}{b}\right)^2\right]\right)\\
q_r\left(x,y,z\right)&=Qf_r\frac{6\sqrt{3}}{abc_r\pi^{3/2}}\exp\left(-3\left[\left(\frac{x}{c_r}\right)^2+\left(\frac{y}{a}\right)^2\right.\right.\\
&\left.\left.+\left(\frac{z}{b}\right)^2\right]\right)\\
f_f+f_r&=2
\end{aligned} \tag{2}$$

où x, y et z sont les coordonnées dans le repère mobile, c_f et c_r sont respectivement les longueurs avant et arrière de l'ellipsoïde selon l'axe d'avance x, Q est l'énergie transmise à la pièce en W, a et b sont la largeur et la profondeur de la demi-ellipsoïde. Enfin, f_f et f_r définissent la répartition avant/arrière de l'énergie apportée. Cela représente donc un total de cinq paramètres indépendants inconnus (c_f, c_r, a, b, Q). Dans le cas présent, chaque dépôt est constitué de deux couches, et la forme du bain est asymétrique (Fig. 2) ; nous considérons que le procédé peut alors être modélisé par une combinaison de deux sources de chaleur volumiques de Goldak (Fig. 4). Rappelons qu'une analyse de sensibilité a permis de s'assurer que chacun des dix paramètres du modèle combiné puisse être identifié, et la zone optimale pour l'implantation des thermocouples a été définie.

4 Résultats et discussion

Différents types de fonctions objectif ont été utilisés pour l'identification des paramètres inconnus : uniquement les thermocouples, uniquement la macrographie, ou les deux (voir [2] pour plus de détails). Les meilleurs résultats ont été obtenus en considérant une fonction objectif mixte donnant 40 % de poids aux données de la macrographie et 60 % de poids à celles des thermocouples. En ne considérant que les thermocouples, les cinétiques thermiques sont bien retrouvées mais la taille du bain fondu est trop petite. En revanche l'utilisation de la macrographie seule permet de retrouver le bon profil de zone fondue mais surestime le champ de température, ce qui reste un résultat surprenant.

La figure 3 montre la comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour la passe 13, en termes de forme de zone fondue et cinétiques thermiques (après élimination des thermocouples peu sensibles). Le modèle permet de retrouver un cordon représentatif du procédé, en dépit de sa complexité. Les gradients thermiques dans le métal de base sont satisfaisants malgré la distance plus ou moins importante par rapport au front de fusion. Certains de ces écarts peuvent néanmoins s'expliquer par les incertitudes expérimentales liées à l'instrumentation en thermocouples (position, contact).

L'optimisation du problème thermique a fourni un paramètre d'énergie Q trop important comparé à la puissance électrique, particulièrement pour que la source proche de la paroi donne la bonne pénétration. Ceci peut alors expliquer les valeurs surestimées de températures calculées. Ce constat a également été fait après optimisation sur d'autres dépôts du chanfrein, ce qui montre ici les limites du modèle conductif pour cette configuration de soudage. Afin d'améliorer l'identification on pourrait néanmoins envisager de définir de nouveaux paramètres inconnus, comme la conductivité thermique ou l'énergie latente de fusion.

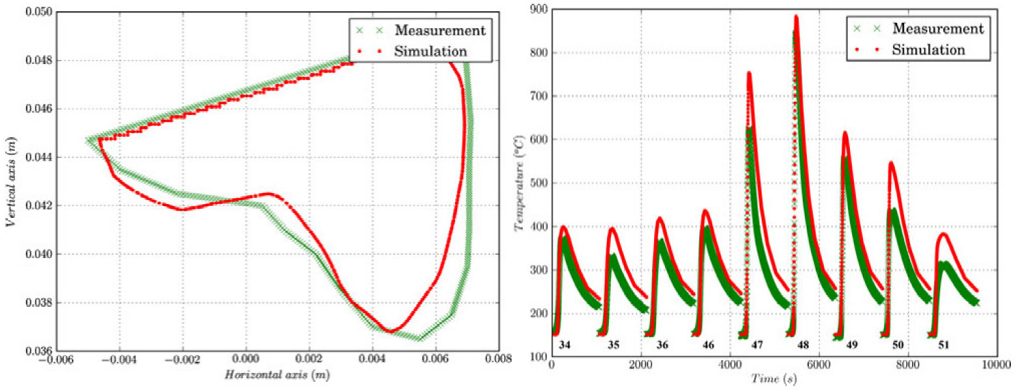

Fig. 3. Comparaison « exp/num » des formes de bain et des cinétiques thermiques après optimisation [2].

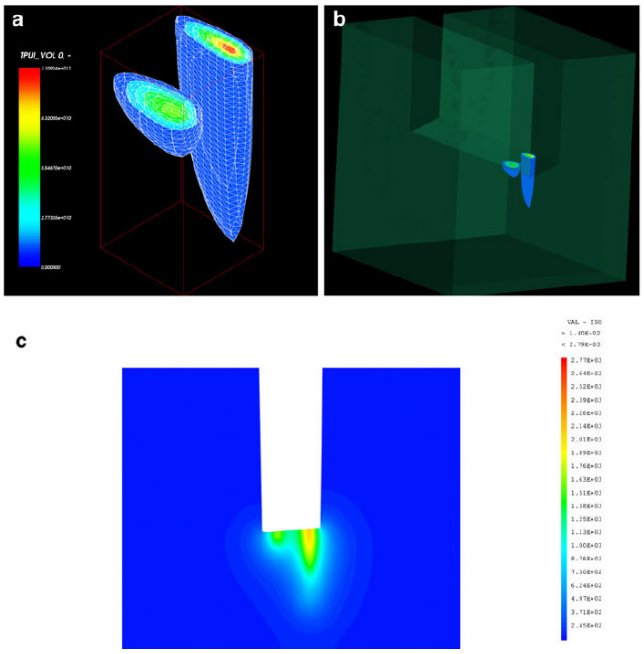

Fig. 4. (a) Distribution de l'énergie déposée, (b) localisation dans le chanfrein, (c) champ de température résultant [2].

Les paramètres du modèle de distribution de chaleur ont été employés pour calculer le retrait du chanfrein au fur et à mesure du remplissage grâce au calcul TMM réalisé avec SYSWELD® [1]. La figure 5 présente la comparaison entre le retrait prédit par la simulation et le retrait mesuré. Les résultats sont satisfaisants puisque l'on constate une bonne adéquation entre les deux courbes, tout au long du remplissage. Bien que des écarts aient été constatés lors du calage de la source de chaleur, le champ thermique calculé est suffisant pour correctement prédire l'ensemble des effets mécaniques à l'origine du retrait pour une opération de soudage MAG en chanfrein étroit profond. Cette démarche va être élargie à d'autres procédés de soudage, l'objectif étant de disposer d'un outil robuste et mature pour la simulation et le développement des applications d'AREVA NP.

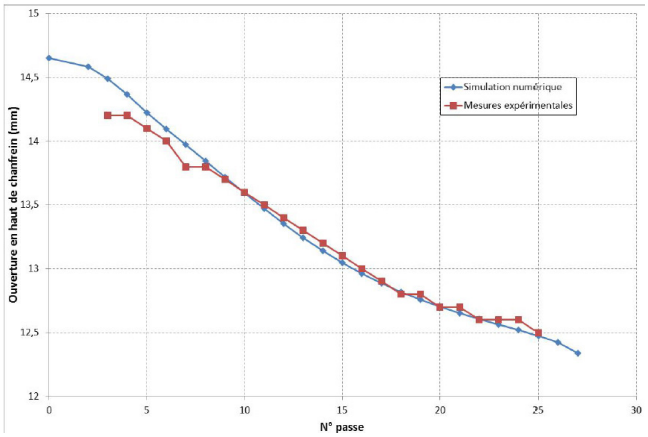

Fig. 5. Comparaison « exp/num » de l'évolution du retrait en haut de chanfrein au cours du remplissage.

5 Conclusion

Dans le cadre des applications de soudage d'AREVA NP, les paramètres d'une source de chaleur équivalente ont été identifiés pour un procédé de soudage MAG multipasse en chanfrein étroit profond. Un essai de soudage dédié a fourni les données d'entrée nécessaires à l'identification de ces paramètres par méthode inverse. La conception de l'expérience a été optimisée grâce au logiciel WPROCESS en proposant la position des thermocouples dans une zone de sensibilité maximale. Grâce à ces mesures de température et à une analyse macrographique des cordons de soudure, les paramètres d'une distribution énergétique composée de deux doubles ellipsoïdes de Goldak ont été identifiés. La comparaison des résultats numériques avec les données expérimentales a permis de valider la source de chaleur et de l'utiliser pour prédire le retrait du chanfrein en cours de remplissage grâce à un outil numérique spécifique. Le résultat est très satisfaisant et montre la cohérence de la démarche visant à coupler une approche numérique au développement d'un mode opératoire de soudage.

Références

[1] F. Gommez, V. Robin, D. Pont, S. Courtin, Numerical Modelling of Repair Welding Using a Temper Bead Process : Application to Dissimilar Metal Welds, ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference, DOI: 10.1115/PVP2011-57596

[2] O. Asserin, D. Ayrault, P. Gilles, E. Guyot, J. Schroeder, *Int. Inst. Welding* (2013), DOI: 10.1007/s40194-013-0109-4

[3] J.A. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, *Metall. Trans. B* **15** (1984) 299-305

[4] http://www-cast3m.cea.fr/

[5] http://www.salome-platform.org/