

MODÉLISATION THERMIQUE DE SOUDURES ASYMÉTRIQUES PAR SOUDAGE LASER

Soumaya LEMKEDDEM et Fethi KHELFAOUI

*Laboratoire LENREZA, Département de Physique, Faculté des Sciences, de Technologie
et des Sciences de la Matière, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 30000 Ouargla, Algérie*

E-mail : slemkeddem@gmail.com , fethi.khelfaoui@gmail.com

RÉSUMÉ : Le soudage par laser est aujourd'hui une technique d'assemblage appliquée dans l'industrie. Cette technique permet de réaliser des soudures étroites et profondes, à des vitesses élevée et en générant de faibles déformations des pièces assemblées. Ceci est dû à la très forte densité d'énergie apportée par le procédé. Des chercheurs ont réalisé des travaux montrant des comparaisons entre des résultats expérimentaux et numériques dans le cas de soudage laser et dans la majorité des modèles numériques proposés les soudures sont considérées symétriques. Nous avons remarqué qu'aucune étude n'a été publiée, jusqu'à présent et à notre connaissance, sur le soudage par faisceau laser d'un alliage de magnésium et d'un autre à base d'aluminium. Dans ce travail on va exposer le principe du procédé de soudage, les sources laser utilisées pour l'assemblage des métaux et aussi les paramètres du soudage laser et leurs influences sur la qualité des soudures obtenues. Une étude historique bibliographique est nécessaire pour connaître les différents alliages étudiés et la modélisation utilisée par les chercheurs. Dans notre travail, on s'intéresse à une modélisation du soudage par faisceau laser dans le cas de soudures asymétriques tout en essayant de suivre l'évolution de la température en fonction du temps.

MOTS-CLÉS : soudage laser, alliage, paramètre de soudage, modélisation

1. Introduction

Depuis la fin des années 80, l'usage du soudage laser est passé du stade du développement en laboratoire de recherche à l'étape de mise en oeuvre sur les sites de production industriels. Le soudage par faisceau laser offre de faibles déformations, d'excellentes propriétés mécaniques associées à la qualité d'aspect et aux faibles dimensions des cordons de soudure. La modélisation numérique est un outil de prédiction du comportement des matériaux, pour l'optimisation des procédés laser.

2. Description d'une opération de soudage par laser

2. 1. Définition

Le laser est une source de rayonnement lumineux, monochromatique et spatialement cohérent. Dans les machines de soudage, le rayonnement est focalisé pour obtenir de grandes densités de puissance, suffisantes pour le soudage industriel des alliages. Cette puissance permet de générer un capillaire rempli de vapeurs métalliques dont les parois sont tapissées de métal liquide en fusion. Le bain de fusion ainsi créé est déplacé et le métal liquide se solidifie après le passage du faisceau assurant la continuité métallurgique entre les pièces (figure1).

Le capillaire a un rôle très important en soudage laser car il permet un transfert de l'énergie directement au coeur du matériau. L'interaction du faisceau laser avec les vapeurs métalliques conduit à une ionisation partielle qui forme un plasma composé de vapeurs ionisées à l'intérieur du keyhole et en surface du bain de fusion. Le plasma de surface constitue une seconde source de chaleur, elle est responsable de la morphologie de la partie supérieure du cordon. Ce plasma joue un rôle bénéfique pour l'échauffement du métal, mais peut absorber une part importante de l'énergie du faisceau laser [1]. Un flux de gaz inerte (Ar ou He) soufflé

à l'endroit de l'impact du laser permet de maîtriser ce plasma et protéger le métal de l'oxydation.

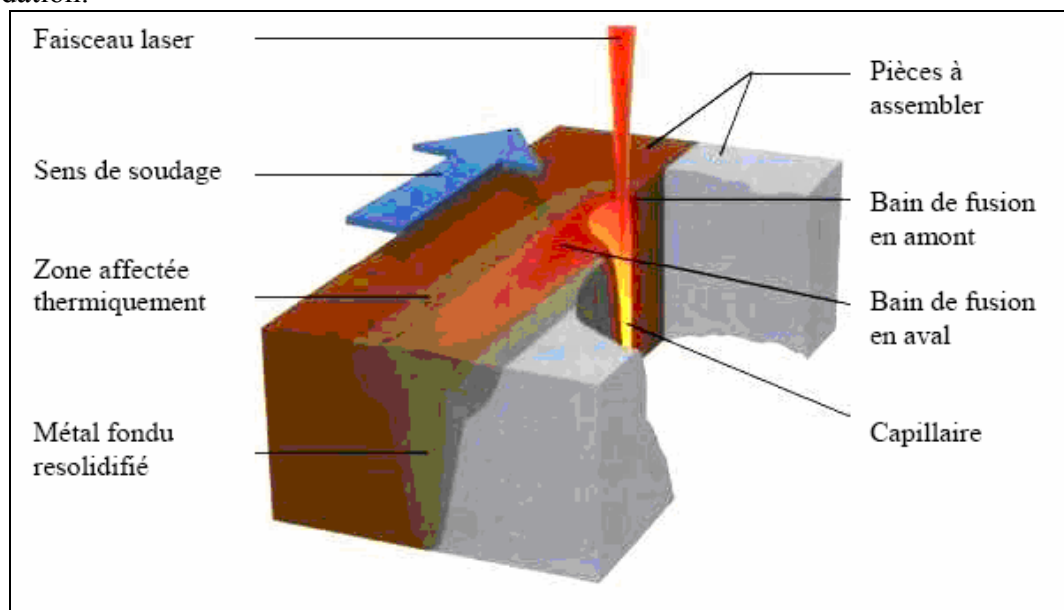


Figure 1 : Principe de soudage par faisceau laser [2]

2. 2. Avantages

Actuellement, les procédés à l'arc TIG à courant alternatif et MIG sont les procédés les plus utilisés pour le soudage et la réparation des pièces métallique [3]. Mais les limites de ces procédés, comme la faible vitesse de soudage, la large zone affectée thermiquement obtenue et les importantes contraintes résiduelles et déformation induites dans les pièces soudées, ont poussé les chercheurs à développer de nouveaux procédés. Le soudage laser et parmi les procédés qui sont en cours de développement surtout dans l'étude des alliages légers. On résume les avantages du soudage par laser dans les points suivants:

- Densité de puissance entre 10^{10} et 10^{13} W/m² contre 5×10^6 à 5×10^8 W/m² pour les procédés de soudage à l'arc [4]
- Vitesse de soudage élevée 1,3m/min contre environ 25 cm/min pour les procédés de soudage à l'arc [3, 5]
- Faible déformation des pièces après soudage
- Zone affectée thermiquement faible
- Pas ou peu de correction sur les cordons soudés
- Assemblage possible sans métal d'apport

2.3. Types de soudage laser

Il existe deux types de lasers industriels pour le soudage des métaux les lasers CO₂ et les lasers YAG.

2. 3. 1. Les lasers CO₂

Le milieu actif est un mélange gazeux constitué de dioxyde de carbone CO₂ (10%), d'azote N₂ (40%) et d'hélium He (50%) sous pression réduite. Des décharges électriques excitent les molécules d'azote, qui transfèrent leur excitation aux molécules de CO₂. Ces derniers émettent un rayonnement d'une longueur d'onde de 10,6 μm qui est transportable seulement par miroirs. La puissance des lasers CO₂ industriels atteint 1,5 à 40 kW. En général ce procédé est utilisé en régime de fonctionnement continu malgré la possibilité de pulser le faisceau. La focalisation du faisceau peut être réalisée par des miroirs ou des lentilles de

focalisation. Pour des densités d'énergie faible (30 J/mm^2) ces lasers sont utilisées pour des soudures profondes [6].

2. 3. 2. Les lasers Nd-YAG (Néodyme Yttrium Garnet)

Ils sont des lasers solides dont le milieu actif, de nature cristalline, est un grenat d'aluminium yttrium ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopé à 10^{20} ions trivalent néodyme (Nd^{3+}). Le rayonnement a une longueur d'onde de $1,06 \mu\text{m}$. Les puissances maximales disponibles sont de 3 à 4 kW. Malgré leur faible puissance, ils sont par excellence l'outil de microsoudure de précision. Il est possible de transporter le faisceau Nd-YAG par fibre optique sur plusieurs dizaines de mètres, donc de souder suivant des trajectoires complexes à l'aide de robots de soudage.

3. Soudage laser des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium peuvent être soudés au laser sans difficulté particulière, à des vitesses de soudage pouvant atteindre plusieurs mètres par minute. Ils ont un taux d'absorption de la lumière relativement faible dans l'infrarouge lointain : 3 % avec le laser CO_2 et 25 % avec le laser Nd : YAG. Cependant, ce coefficient d'absorption augmente brusquement au delà de la température de fusion, et atteint environ 90 % lorsque la température de vaporisation du matériau est atteinte [7]. Quelques alliages contenant du magnésium ont un seuil d'interaction plus bas que les autres alliages, ce qui permet de les souder avec une énergie moindre. Il est inutile d'utiliser une densité de puissance trop élevée, parce que les vapeurs métalliques forment un plasma qui fait écran. Cela est surtout vrai avec les lasers CO_2 . Pour éviter une oxydation immédiate du bain de soudure, il est nécessaire d'utiliser un gaz de protection. Avec les lasers CO_2 , les meilleurs résultats sont obtenus avec des mélanges argon-hélium ou avec de l'hélium pur. Avec les lasers Nd : YAG, on peut également utiliser l'argon.

4. Soudage laser des alliages de magnésium

Les caractéristiques spécifiques intéressantes de ces alliages sont les suivantes:

- Faible masse volumique comparée à celles des aciers et aux alliages d'aluminium. Leur utilisation permet la réduction du poids des pièces mécaniques
- Conductivité thermique élevée par unité de volume qui permet des échanges thermiques faciles
- Bonne soudabilité pour la plupart des alliages

Par contre les alliages de magnésium présentent quelques inconvénients qui ont limité leurs utilisations et qui consistent en :

- leur faible module d'élasticité en comparaison avec ceux des aciers et des alliages d'aluminium [1]
- leurs résistances au fluage et à la fatigue à haute température
- leurs faibles propriétés en surface (faible dureté) d'où la nécessité d'un traitement de surface

Le choix des procédés de soudage pour l'assemblage de pièces en alliages de magnésium, est principalement conditionné par les propriétés physiques et chimiques de ces derniers. Plusieurs études expérimentales ont montré que le soudage des alliages de magnésium par le laser Nd-YAG est plus efficace que celui par le laser CO_2 [8].

5. Modélisation du soudage

5. 1. Étude bibliographique

Etudier les différentes modélisations et méthodes de résolution utilisées pour l'étude numérique des procédés de soudage est indispensable.

Il y a beaucoup de chercheurs qui ont traité la simulation ou la modélisation de la soudure laser on cite comme exemple:

- En 2009, A. Belhadj (2) a proposé un modèle numérique qui permet de suivre l'histoire thermique et mécanique au cours du soudage par faisceau laser d'un alliage de magnésium. La méthode utilisée est celle des éléments finis, bien adaptée pour la résolution numérique du problème
- C. Ferdinand (4), en 2005, a essayé de caractériser des assemblages soudés par procédé laser de tôles d'alliages de titane réfractaire. L'objectif de la démarche était d'évaluer les effets des paramètres de soudage laser CO₂ sur la morphologie, la microstructure et les propriétés mécaniques de cet alliage tout en recherchant les assemblages optimaux.
- H. Ki et al [9], en 2002, ont développé un modèle qui permet de prédire, localement, l'évolution de la forme du keyhole et du bain de fusion au cours de l'interaction laser-matière en fonction des paramètres du procédé.

Bien que les travaux sur la modélisation ou la simulation numérique des procédés de soudage laser soient très abondants, mais très peu qui sont intéressés à la soudure hétérogène par laser.

- En 2007, T. Paris et al (10) ont essayé de caractériser le comportement du joint soudé Ta/TiAl6V4 et d'analyser l'influence des hétérogénéités sur la déformation locale du joint soudé. Le modèle utilisé a été développé par K. Saanouni [11] et décrit un comportement élastoviscoplastique
- Dans la thèse de D. Favez (12), soutenu en 2009 l'objectif principal était l'étude du soudage laser entre de l'or et de l'acier inoxydable. Une simulation du champ de température lors de la solidification a été réalisée.
- une étude métallurgique et mécanique de l'assemblage hétérogène acier/aluminium par les procédés laser a été faite par G. Sierra (13) dans le cadre de son doctorat en 2006. Le modèle numérique développé dans ce travail permet 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 modélisation thermique est réalisée en utilisant les dimensions réelles de l'assemblage et un modèle tridimensionnel.

Dans notre étude, nous envisageons de trouver l'évolution de la température à chaque position en fonction du temps dans le cas des soudures asymétriques (alliage de magnésium et d'un autre à base d'aluminium).

5. 2. Phénomènes physiques impliqués

Plusieurs phénomènes physiques interviennent de manière couplée dans le soudage. Ils peuvent être d'origine thermique (conduction, convection), métallurgique (solidification transformation de phase, fusion du matériau), mécanique des fluides (quantité de mouvement) et mécanique (déformations et contraintes).

Généralement les changements de phase solide - liquide, solide – solide modifient profondément les propriétés des matériaux, mais ils peuvent être négligés dans notre cas [2].

Dans le cas de soudage laser, le plasma émet des rayonnements qui peuvent être étudiés afin de caractériser les propriétés du milieu. Nous avons réalisé ce travail pour les torches à plasmas pour la sidérurgie [14].

5. 3. Modélisation de la source de chaleur

Des travaux publiés sur le soudage laser montre que le capillaire a un diamètre de l'ordre de grandeur de la tâche focale du laser [1, 15]. Le capillaire est directement influencé par le faisceau incident : il est supposé être de forme cylindrique de diamètre D et rempli de gaz résultant de l'émission des vapeurs métalliques. La zone liquide contient du métal en fusion, elle est supposée être de forme cylindrique de diamètre d . Elle dépend de la vitesse du soudage, du diamètre du capillaire, et des propriétés physiques du matériau et de la puissance du faisceau laser incident. La partie solide constitue tout le reste de la plaque à souder et elle est soumise à une source mobile de chaleur, de diamètre D et de température égale à la température de fusion du métal.

5. 4. Modélisation thermique

La modélisation est illustrée sur la figure 2.

On a négligé les phénomènes suivants:

- la chaleur latente de changement d'états physiques (solide - liquide)
- le changement de phase (solide – solide)

Chaque pièce possède ses propres grandeurs de conductivité thermique, de masse volumique et de chaleur massique qui dépendent de la température. Chaque pièce possède alors sa propre diffusion de chaleur et sa propre distribution de température.

- Une source de chaleur volumique mobile Q qui se déplace à une vitesse V (avec une répartition uniforme de la puissance dans le keyhole).
- Le plasma absorbe une partie de l'énergie du faisceau laser
- Une source d'énergie surfacique q au niveau du plasma.
- Un transfert d'énergie par convection sur la surface extérieure de la pièce.
- Des pertes d'énergie par rayonnement au niveau de la surface éclairée par le faisceau laser.
- Un flux d'énergie q' sur la surface de contact entre les deux pièces.

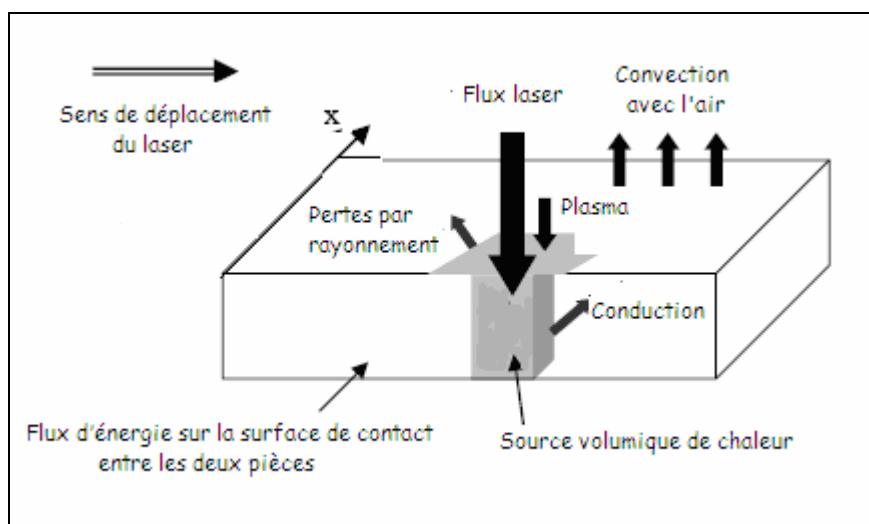


Figure 2 : La modélisation du bilan énergétique au cours du soudage laser

5. 5. Équations de chaleur

Au cours du soudage (passage du faisceau laser) l'équation de chaleur est donné par :

$$\frac{\partial \rho(T)C(T)T(x_i, t)}{\partial t} - \text{div}(\lambda(T) \text{grad}T(x_i, t)) - Q = 0 \quad (1)$$

La résolution est appliquée pour chaque position de la source de chaleur et permet de donner la valeur de la température en tout point de la pièce et à chaque instant du traitement.

- La condition initiale est la température des pièces avant le soudage.

$$T(t=0) = T_{\text{ambiante}} \quad \text{à chaque position}$$

- Les conditions aux limites dans notre cas sont de type densité surfacique de flux de chaleur qui dépend en général de la température et du temps.
 - Pertes de chaleur par convection naturelle à l'air au niveau de la surface extérieure de la pièce:

$$\lambda(T)(\text{grad}T(x_i, t))_{\text{surface}} + h(T(x_i, t) - T_{\infty}) = 0 \quad (2)$$

- Perte d'énergie par rayonnement sur la surface plasma:

$$\lambda(T)(\text{grad}T(x_i, t))_{\text{surface}} + \varepsilon \sigma (T(x_i, t)^4 - T_{\infty}^4) = q \quad (3)$$

- Flux d'énergie $q'=0$ sur la surface de contact entre les deux pièces:

$$\lambda(T) \text{grad}T(x_i, t) = 0 \quad (4)$$

Pendant le refroidissement il n'y a pas de source volumique de chaleur ($Q=0$) alors l'équation de chaleur sera:

$$\frac{\partial \rho(T)C(T)T(x_i, t)}{\partial t} - \text{div}(\lambda(T) \text{grad}T(x_i, t)) = 0 \quad (5)$$

- La condition initiale est la température des pièces après le soudage.

$$T(t=t_R) = T_{\text{fin S}} \quad \text{à chaque position}$$
- Les conditions aux limites dans ce cas sont:
 - Pertes de chaleur par convection naturelle à l'air au niveau de la surface extérieure de la pièce:

$$\lambda(T)(\text{grad}T(x_i, t))_{\text{surface}} + h(T(x_i, t) - T_{\infty}) = 0 \quad (6)$$

- Flux d'énergie q' sur la surface de contact entre les deux pièces:

$$\lambda(T) \text{grad}T(x_i, t) = q' \quad (7)$$

Nomenclature

C	Chaleur massique
<i>h</i>	Coefficient de convection
<i>q</i>	Source de chaleur surfacique du plasma
<i>q</i>	Source de chaleur surfacique entre les deux pièces
<i>Q</i>	Source de chaleur volumique
<i>T</i>	Température
T_{∞}	Température du fluide
<i>t</i>	temps
t_R	début du refroidissement
$T_{\text{fin S}}$	température fin de soudage

x	Coordonnées cartésiennes
ρ	Masse volumique
λ	Conductivité thermique
σ	Constante de Boltzmann
ε	Emissivité

Nous sommes actuellement en train d'essayer de résoudre numériquement le problème et nous estimons comparer les résultats numériques avec d'autres expérimentales ou d'autres travaux pour vérifier l'efficacité du modèle.

Références

- [1] D. Dangoise, D. Hennequin et V. Zehnlé, "*Les laser*"; Dunod, Paris (2004)
- [2] A. Belhadj; thèse de doctorat: "*Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser: application aux alliages de magnésium*"; École Nationale d'Ingénieurs de Tunis et l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers France (2009)
- [3] S. Lemkeddem, Mémoire de magister: "*Contribution à l'étude du rayonnement émis par le Plasma lors de l'interaction des torches à plasma avec les métaux*"; Université de Ouargla, Algérie (2008)
- [4] C. Ferdinand; thèse de doctorat: "*Mise en œuvre et caractérisation d'assemblage soudés par procédés TIG et LASER de tôles d'alliages de titane réfractaires*"; Institut National Polytechnique de Toulouse (2005)
- [5] www.bil-ibs.be/fr
- [6] www.industrial-lasers.com/articles
- [7] www.alcan-marine.com/Internet/tmi/marine.../Chap06.pdf
- [8] H. Haferkamp, F. von Alvensleben, I. Burmester et M. Niemeyer, "*The characteristics of laser beam welded magnesium alloys*", Proceedings of the Laser Materials Processing Conference ICALEO, Part 2, , pp. 140-149 (1997)
- [9] H. Ki, P.S.Mohanty et J. Mazumder, "*simulation of keyhole evolution, velocity, temperature profile, and experimental verification*", Metallurgical and Materials Transactions A, **33**, 1831-1842 (2002)
- [10] Thomas Paris, Khémaïs Saanouni, Manuel Francois et Damien Delaplanche; "*Caractérisations expérimentales et identification d'un joint soudé hétérogène : application aux liaisons Ta/TiAl6V4*"; 18^{ème} Congrès Français de Mécanique Grenoble (2007)
- [11] K. Saanouni, et J. L. Chaboche; "*Computational damage mechanics. Application to metal forming, Numerical and Computational methods*", Elsevier Oxford, vol. 3, n. 7 pp. 321-376(2003)
- [12] D. Favez; thèse doctorat "*Soudage laser or-acier: métallurgie et procédé*"; École Polytechnique Fédérale de Lausanne (2009)
- [13] G. Sierra; Thèse de doctorat "*Etude métallurgique et mécanique de l'assemblage hétérogène acier/aluminium par les procédés laser et TIG*"; Université Montpellier II (2006)
- [14] S. Lemkeddem et f. Khelfaoui ; "*Spectre de raies d'émission d'une torche à plasma en utilisant la technique de l'inversion d'Abel*"; Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur Ouargla Algérie, Vol. **1** N° 3 (2009)
- [15] F.Briand, K. Chouf, P.Lefebvre et O.Matile; "*Soudage hybride arc/laser*"; soudage et techniques connexes **ISSN**, vol. 56, n°9-10, pp. 9-13 (2002)