

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Etude du capillaire laser formé lors de soudage laser de matériaux de nature différente : approche expérimentale et numérique

Directeur de thèse : J.M. JOUVARD

Encadrement : I.TOMASHCHUK, J.M. JOUVARD,
Département PMDM du Laboratoire ICB

Mots-clés : assemblage dissimilaire, laser, spectroscopie d'émission atomique, imagerie rapide, modélisation numérique multiphysique

L'assemblage par laser représente un outil précis et flexible pour la réalisation des liaisons métallurgiques entre des *matériaux à priori incompatibles*, pour des designs simplifiés et plus performants avec des applications dans le domaine de l'aéronautique, de l'industrie, de l'automobile. Lors d'un processus de soudage laser, le passage du faisceau de forte puissance sur un matériau métallique crée un fort gradient de température et les mouvements complexes du métal fondu, ainsi qu'une vaporisation très localisée du substrat formant une plume de vapeur fortement rayonnante. Les fortes pressions générées par l'éjection des vapeurs créent un capillaire (trou dans la zone fondue) de quelques mm dans lequel le faisceau laser est guidé en profondeur. Comme l'ont montré les études préalables réalisées par l'équipe, le capillaire formé entre des matériaux de nature différente *peut avoir une forme asymétrique, voire même être totalement décalé par rapport au plan du joint*. Le comportement du capillaire définit en grande partie la pénétration, la composition et donc également la résistance mécanique de la zone fondue. La compréhension et la prédiction de son comportement sont des *éléments-clés pour la maîtrise de la qualité de la jonction* entre les matériaux métalliques de nature différente. Cependant, *la phénoménologie liée au capillaire laser formé à la jonction dissimilaire n'a pas été étudiée jusqu'à présent*.

Le but de cette thèse est donc d'élucider la phénoménologie du comportement du capillaire à la jonction dissimilaire par des *méthodes expérimentales* comme la spectroscopie du plasma de soudage, l'observation par camera rapide, ... et de proposer un *modèle numérique multiphysique* capable de prédire l'évolution de sa forme et sa température ainsi qu'à estimer les vitesses créées dans les phases liquide et gazeuse.

Au cours de l'impulsion laser, la fusion et la vaporisation de chacun de deux matériaux se produisent à des instants différents, du fait de l'écart en propriétés thermophysiques. Pour comprendre la formation du capillaire, il est important de caractériser l'évolution de la zone liquide et l'éjection des vapeurs. L'observation par *camera rapide* (> 1000 images/s) permettra de former une base de données sur l'évolution temporelle de la zone liquide, qui sera complétée par la *cartographie post-mortem* de la distribution des éléments dans la jonction (MEB-EDX). L'étude de la vapeur formée dans le capillaire est plus complexe, parce que la vapeur devient observable uniquement lorsqu'elle sort du capillaire et se détend dans le milieu ambiant en créant la plume. L'étude par *spectrométrie d'émission atomique* (Czerny-Turner, 1.33m, 2400tr/mm) de cette plume permettra d'obtenir des informations sur la

température et la composition de la vapeur. Pour pouvoir remonter aux caractéristiques physiques de la vapeur à l'intérieur du capillaire (température, pression, composition), il sera nécessaire d'effectuer une modélisation physique du processus de détente. L'étude expérimentale se focalisera sur quelques *couples-modèles*, choisies pour la grande différence de leurs propriétés thermophysiques (titane-aluminium, aluminium-magnésium et cuivre-inox).

Dans le premier temps, on étudiera le soudage pulsé, pour mettre en évidence la vaporisation compétitive des deux côtés de la jonction en fonction du temps d'impulsion. Pour effectuer cette étude temporelle, un travail préalable sur la mise au point des expériences en spectroscopie sera nécessaire (amélioration du système de visée optique, synchronisation temporelle, procédure d'analyse des données, etc.). En complément de la spectrométrie, l'imagerie spectrale de la plume sera réalisée pour mettre en évidence l'évolution temporelle de sa composition. L'analyse des *nanoparticules* formées lors de la condensation de la vapeur fournira les informations complémentaires permettant de remonter à la composition de la vapeur. Par la suite, l'effet du décalage progressif du faisceau laser par rapport au plan du joint sur le comportement de la zone liquide et sur la composition des vapeurs sera étudié, dans le cas du soudage pulsé et du soudage continu.

La corrélation de tous ces résultats expérimentaux (l'ensemble état liquide + vapeur) servira de base pour améliorer la simulation numérique prédictive du processus de formation du capillaire dans le cas de la jonction dissimilaire (logiciel FEM COMSOL Multiphysics). La modélisation complète du processus de soudage nécessite de prendre en compte l'aspect thermique, les mouvements du métal fondu, la formation du mélange et l'évolution du capillaire qui est le siège du transfert d'énergie entre le faisceau laser et la phase liquide. Les travaux récents de l'équipe sur la modélisation numérique du soudage laser ont permis d'étudier l'évolution de la surface libre lors de la progression du capillaire entre les deux matériaux différents. Cependant il faut faire des hypothèses simplificatrices sur la pression à l'intérieur du capillaire, sans prendre en compte les flux de vaporisation de deux matériaux. L'objectif du *travail de simulation*, qui sera fait dans le cadre de cette thèse, consiste à améliorer le réalisme de la représentation du capillaire en *prenant en compte la vaporisation compétitive de deux matériaux*.

Profil du candidat :

Master de physique (lasers, optique, spectroscopie) de bon niveau.

L'expérience en modélisation numérique (COMSOL ou un autre logiciel FEM) sera appréciée.

PHD THESIS PROPOSITION (2019)

Study of the keyhole formed during the dissimilar laser welding: experimental and numerical approach

Supervisors: I.TOMASHCHUK, J.M. JOUVARD,
Department PMDM, Laboratoire ICB

Key words: dissimilar welding, laser, atomic emission spectroscopy, rapid imaging, multiphysical numerical modeling.

Laser welding is a precise and flexible tool for metallurgical bonding of *a priori incompatible materials* in view of simplified product design with applications for aerospace, production and transport.

During laser welding process, the displacement of the high power beam focused on the metallic material produces high temperature gradient and complex movements of molten metal as well as local vaporization of the substrate followed by the formation of strongly emitting vapor plume. High pressures generated by the ejecting vapors form several mm deep keyhole (a cavity in the melted zone) which guides the laser radiation in depth of the material. As it was indicated by our previous studies, the keyhole formed between the materials having different nature *can have asymmetric shape and even be totally shifted away from the joint line*. The behavior of the keyhole strongly influences the penetration and composition of the melted zone, and thus the tensile properties of the melted zone. The comprehension and the prediction of keyhole behavior are the *key-elements for the quality of the weld* formed between dissimilar materials. However, *the phenomenology related to the keyhole formation on the dissimilar joint has not been studied yet*.

The aim of this PhD thesis is to elucidate the phenomenology of keyhole behavior during dissimilar welding with help of *experimental approach* such as spectroscopy of vapor plume and rapid imaging of the melted zone and to *propose a multiphysical numerical model* capable to predict the evolution of keyhole shape and temperature as well as to estimate the velocity field created in liquid and vapor phases.

During the laser pulse, the fusion and the evaporation of each of joined materials happens in different time, because of the mismatch in their thermophysical properties. To comprehend the formation of the keyhole, it is important to characterize the evolution of the liquid zone and the ejection of the vapors. *High speed imaging* (> 1000 images/s) will allow to create a database of temporary evolution of the melted zone, that will be completed by the post-mortem *cartography of the elements distribution* in the weld (SEM-EDX). The study of the vapor formed in the keyhole is more complex, because this vapor becomes observable only after it quits the keyhole and expands in the ambience in form of the plume. *Atomic emission spectrometry* study (Czerny-Turner, 1.33m, 2400tr/mm) of this plume will allow collecting the information about the temperature and the composition of the vapor. To accede to the physical characteristics of the vapor inside the keyhole (temperature, pressure, composition), it will be necessary to perform the physical modelling of expansion of the plume. The experimental study will be focused on several *model-couples*, chosen because of important mismatch in their thermophysical properties (titanium-aluminum, aluminum-magnesium and copper-steel).



In the first place, the pulsed welding will be studied, to highlight the competitive vaporization of two sides of the joint in function of pulse duration. To perform this time-dependent study, some preliminary work on the development of experimental setup for the spectrometry will be needed (the improvement of optical aiming system, time synchronization, the procedures of data processing etc.). In addition to the spectrometry, the *spectral imaging* of the plume will be carried out to highlight the temporary evolution of its composition. The analysis of the *nanoparticles* formed during the condensation of the vapor will provide the additional information about the initial composition of the vapor. In the next step, the effect of progressive laser beam offset from joint line on the behavior of the melted zone and on the vapor composition will be studied for both pulsed and continuous welding mode.

The correlation of all these experimental results (in liquid and vapor phases) will serve to enhance of the predictive numerical model of keyhole formation in case of dissimilar joining (FEM package COMSOL Multiphysics). The explicit modeling of welding process has to take into account the heat transfer, the fluid flow in the melted zone, the mixing of the materials and the evolution of the keyhole, which is the siege if energy transfer between the laser beam and the liquid zone. Our recent works in numerical modeling of laser welding has allowed studying the evolution of free surface during the drilling of the keyhole between the materials of different nature. However, a number of simplification hypotheses was made for the description of internal pressure in the keyhole, without taking into account the vaporization of two metals. The aim of *numerical simulation* within the frame of this thesis will consist to ameliorate the realism of keyhole representation by *taking into account the competitive vaporization of two materials*.

Candidate profile :

Master of physics (lasers, optics, spectroscopy) with good academic results.

The experience in numerical modelling (with COMSOL or any other FEM software) will be appreciated.