

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 596

Matière, Molécules, Matériaux et Géosciences

Spécialité : Sciences des Matériaux

Par

Clément LE FALHER

Modélisation numérique multi-échelle et approche expérimentale du procédé de fabrication additive MAG-CMT pour la prédiction des déformations et des contraintes résiduelles

Soutenance prévue à Nantes, le 15 décembre 2023

Unité de recherche : Institut des matériaux de Nantes Jean Rouxel (IMN) UMR CNRS 6502

version provisoire

Rapporteurs avant soutenance :

Fabien Soulié	Professeur des Universités – Université de Montpellier
Michel Bellet	Professeur des Universités – Ecole des Mines ParisTech

Composition du Jury :

Président : Prénom Nom Fonction et établissement d'exercice (à préciser après la soutenance)

Examineurs :	Anne-Laure Helbert	Professeure des Universités – Université Paris-Saclay
	Fabien Soulié	Professeur des Universités – Université de Montpellier
	Michel Bellet	Professeur des Universités – Ecole des Mines ParisTech
	Muriel Carin	Professeure des Universités – Université Bretagne Sud
	Anne Higelin	Docteure/Ingénieure de recherche – ArcelorMittal, Industeel

Dir. de thèse :	Pascal Paillard	Professeur des Universités – Nantes Université
Co-dir. de thèse :	Philippe Le Masson	Professeur des Universités – Université Bretagne Sud
	Mickael Courtois	Maître de conférences, HDR – Université Bretagne Sud

Invité(s)

Simon Morville	Docteur/Ingénieur de recherche – IRT Jules Verne
Christophe Kerisit	Docteur/Ingénieur de recherche – Naval Group

Titre : Modélisation numérique multi-échelle et approche expérimentale du procédé de fabrication additive MAG-CMT pour la prédiction des déformations et des contraintes résiduelles

Mots clés : fabrication additive arc-fil, MAG-CMT, modélisation numérique, acier inoxydable martensitique, déformations, contraintes résiduelles

Résumé : La fabrication additive métallique arc-fil permet de fabriquer des pièces de grandes dimensions avec un besoin en matériau relativement faible. La fabrication se fait par dépôt de métal fondu qui engendre des gradients thermiques responsables de l'apparition de déformations et de contraintes résiduelles. Ainsi, cette thèse vise à développer des modèles numériques prédictifs de l'état de contraintes et de déformations applicables à la fabrication additive arc-fil selon deux méthodes.

La première, que l'on retrouve couramment dans la littérature pour l'étude du soudage et plus récemment pour la fabrication additive, néglige les effets hydrodynamiques du bain de fusion et utilise des termes sources équivalents pour représenter l'apport de chaleur du procédé. Des calculs métallurgiques et mécaniques sont ensuite faits à partir de cette analyse thermique pour déterminer l'état mécanique finale de la pièce. Pour développer et valider les modèles, des caractérisations expérimentales du procédé ont été menées.

De plus, des caractérisations des propriétés thermo-physiques, métallurgiques et thermo-mécaniques ont été réalisées afin de décrire correctement le comportement d'un acier inoxydable martensitique lors de l'opération de fabrication.

Une seconde méthode, plus innovante, vise à prédire l'état de contraintes et de déformations de la pièce fabriquée à travers une approche multi-échelle. Un premier modèle à l'échelle du bain de fusion permet de calculer précisément les écoulements et les transferts de chaleur au cours du procédé. Les résultats du modèle, qui sont le champ de température et la forme géométrique du cordon de soudure, sont transférés et utilisés en données d'entrée d'un modèle thermo-mécanique à l'échelle de la pièce.

Les résultats de chaque méthode sont confrontés à des mesures expérimentales de contraintes et de déformations. Les avantages et limitations de chaque méthodologie sont exposés.

Title : Multiscale numerical modelling and experimental approach to the MAG-CMT additive manufacturing process for predicting distortions and residual stresses

Keywords : WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), MAG-CMT, numerical modelling, martensitic stainless steel, distortions, residual stresses

Abstract: Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) enables large parts to be manufactured with a relatively low material requirement. Manufacturing is carried out by depositing molten metal, which generates thermal gradients responsible for the appearance of deformations and residual stresses. The aim of this thesis is to develop predictive numerical models of the state of stress and strain applicable to arc-wire additive manufacturing, using two methods.

The first, commonly found in the literature for the study of welding and more recently for additive manufacturing, neglects the hydrodynamic effects of the melt and uses equivalent source terms to represent the heat input of the process. Metallurgical and mechanical calculations are then made based on this thermal analysis to determine the final mechanical state of the part. To develop and validate the models, experimental characterisation of the process was carried out.

Moreover, characterisations of the thermo-physical, metallurgical and thermo-mechanical properties were carried out in order to properly describe the behaviour of a martensitic stainless steel during the manufacturing process.

A second, more innovative method aims to predict the state of stress and strain of the manufactured part using a multi-scale approach. An initial model at melt pool scale is used to calculate precisely the fluid flows and heat transfers during the process. The results of the model, which are the temperature field and the geometric shape of the weld bead, are transferred and used as input data for a thermo-mechanical model at the scale of the part.

The results of each method are compared with experimental stress and strain measurements. The advantages and limitations of each methodology are outlined.