

# THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 596

*Matière, Molécules, Matériaux et Géosciences*

Spécialité : Sciences des matériaux

Par

**Hugues MACÉ**

## Développement de la fabrication additive laser-fil (Wire-Laser Additive Manufacturing, WLAM) d'alliages métalliques complexes à forte valeur ajoutée

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 8 novembre 2024

Unité de recherche : Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN), UMR CNRS 6502

### Rapporteurs avant soutenance :

Patrice PEYRE  
Joël ALEXIS

Directeur de recherches  
Professeur des Universités

PIMM Paris  
LGP Tarbes

### Composition du Jury :

Examineurs : Patrice PEYRE  
Joël ALEXIS  
Fabien SOULIÉ  
Elodie PAQUET  
Anne-Sophie THORR

Directeur de recherches  
Professeur des Universités  
Professeur des Universités  
Maître de Conférences  
Ingénieure

PIMM Paris  
LGP Tarbes  
LMGC Montpellier  
LS2N Nantes  
NAVAL GROUP Indret

Dir. de thèse : Pascal PAILLARD

Professeur des Universités

IMN Nantes

Encadrants : Laurent COUTURIER  
Thomas HOANG

Maître de Conférences  
Ingénieur

IMN Nantes  
ILS Fontenay-Trésigny

### Invité(s) :

Andre ELTZE

Docteur-Ingénieur

LASERLINE Mülheim-Kärlich

**Titre :** Développement de la fabrication additive laser-fil (Wire-Laser Additive Manufacturing, WLAM) d'alliages métalliques complexes à forte valeur ajoutée

**Mots clés :** Fabrication additive laser-fil, contrôle du procédé, acier à haute limite d'élasticité, Inconel 625, stellite 6G, dépôts à gradients de fonction.

**Résumé :** La fabrication additive est un procédé de plus en plus utilisé au fil des années et plus spécifiquement par les industriels qui l'emploient pour la fabrication de pièces composées d'alliages à haute valeur ajoutée. Parmi ces procédés d'impression 3D industriels, la fabrication additive laser-fil (WLAM) s'est récemment développée grâce à l'arrivée de nouvelles têtes laser permettant l'apport d'un fil coaxial au faisceau laser, qui est, quant à lui, de forme annulaire. Cette technologie encore récente offre une plus grande flexibilité de fabrication et permettrait d'obtenir une meilleure qualité des pièces fabriquées. Néanmoins, le comportement et les interactions en cours de dépôt du procédé WLAM restent peu connus. Par conséquent, ces travaux ont visé à définir les limites actuelles du procédé WLAM équipé d'une tête à faisceau coaxial afin d'apporter des améliorations techniques pour étendre son application à l'échelle industrielle. Pour cela, trois alliages ont été étudiés à savoir un acier à haute limite d'élasticité, l'Inconel 625 et la stellite 6G. Ainsi, l'étude du domaine de stabilité a été menée en faisant varier les principaux paramètres identifiés qui sont la puissance laser, la vitesse de fil, la vitesse de déplacement, la distance de travail et le diamètre de la fibre optique utilisée. Une modélisation du faisceau annulaire a été réalisée pour

explorer l'influence de la proportion d'éclairement sur le fil et le substrat, pour chacun des deux diamètres de fibre utilisés.

Ces études paramétriques ont permis d'évaluer les capacités du procédé WLAM pour cette configuration de tête laser et ont mis en évidence l'importance d'adapter les paramètres tels que la puissance laser ou la distance de travail en cours de fabrication afin d'assurer un dépôt stable. Ainsi, l'utilisation de boucle d'asservissement pour adapter ces deux paramètres en cours de dépôt a été appliquée. Pour cela, un pyromètre et un capteur de distance utilisé pour respectivement mesurer la température du bain de fusion et la hauteur des couches ont montré des résultats probants pour obtenir une bonne stabilité du procédé. Ainsi, des géométries réalisées en acier HLE ou en Inconel 625 ont été déposées sans instabilités majeures sur plus de cents couches. En parallèle, des optimisations de paramétrie et des stratégies de remplissage ont été explorées pour ce procédé afin de limiter l'apparition de défauts. Pour finir, des caractérisations microstructurales et mécaniques ont été réalisées sur les alliages utilisés en WLAM. Afin d'introduire l'application de ce procédé aux pièces à gradients de fonction, les trois alliages employés ont été déposés au sein d'une même pièce.

**Title:** Development of Wire-Laser Additive Manufacturing (WLAM) for complex high added value alloys

**Keywords:** Wire-Laser Additive Manufacturing, monitoring, High Strength low alloy, Inconel 625, stellite 6G, functionally graded materials

**Abstract:** Additive manufacturing has been widely used over the last few decades, especially by industrial companies that adopt it to produce parts made from high value-added alloys. Among these industrial 3D printing processes, the wire laser additive manufacturing (WLAM) has advanced by the emergence of new laser heads that enable a coaxial wire to a ring laser beam. This novel technology offers greater manufacturing flexibility, and could lead to higher quality parts. However, the behavior and interactions of the WLAM process during deposition are not well understood. Consequently, the aim of this work was to define the current limits of the WLAM process equipped with a coaxial laser head to bring, in a second step, technical improvements needed to extend its application to industrial scale. For this purpose, three alloys were studied which are : an high strength low alloy (HSLA), Inconel 625 and a stellite 6G. From these feedstocks, a study of the stability domain was carried out by varying the main parameters such as laser power, wire feed speed, travel speed, working distance and optical fiber diameter. For the two fiber diameters used, the modeling of the ring beam was made to explore the influence of the proportion of wire/substrate irradiance.

These parametric studies identified the capabilities of the WLAM process for this laser head configuration, and the importance of monitor parameters such as laser power or working distance during manufacture has been proved. Therefore, the use of control loops to adjust these two parameters during deposition was implemented. For this purpose, a pyrometer and a distance sensor were used to measure the temperature of the melting pool and the layer thickness respectively. Good stability of the process was achieved with their use. Geometries with more than one hundred layers were obtained from HSLA steel or Inconel 625 were deposited without major instabilities. In parallel, the optimization of the parameters and building strategies were carried out for this process to limit defects. Finally, microstructural and mechanical characterizations were conducted on the alloys used with the WLAM. To introduce the application of this process to functionally graded parts, these three alloys were deposited in a single part.