

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Maîtrise des caractéristiques géométriques et métallurgiques d'un nouvel alliage d'aluminium par la fabrication de pièces à parois fines avec le procédé additif laser-fil.

Référence : **MAS-DMAS-2024-29**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Septembre 2024

Date limite de candidature : Avril-Mai 2024

Mots clés

Fabrication additive laser fil – Alliages d'aluminium, stratégie de fabrication, santé métallurgique, propriétés mécaniques

Profil et compétences recherchées

- titulaire d'un master 2 recherche, du domaine du génie mécanique et/ou matériaux ;
- connaissances générales sur les procédés de fabrication, le pilotage de machines et robots ;
- connaissances sur les matériaux, sur leur comportement thermique, mécanique ;
- appétence pour l'expérimentation et la mesure ;
- maîtrise de langage de programmation scientifique (Matlab, Python) ;
- niveau de langue en anglais minimum (B2) pour la communication écrite et orale.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

L'apport de matière sous forme de fils métalliques, tel qu'on l'utilise traditionnellement en soudage, est mis en œuvre depuis quelques années pour la fabrication de pièces 3D depuis l'essor de la fabrication additive (FA). Par rapport aux premières technologies FA basées sur l'apport de poudres, ces nouvelles technologies offrent des caractéristiques complémentaires en termes de productivité (taux de dépôt plus important), de propriétés matériaux, d'ajout de fonction, de réparation, ce qui permet d'envisager de nouvelles applications dans des secteurs non adressés jusque-là. Il faut également signaler un risque plus faible de contamination matière lorsque le matériau d'apport est sous forme de fil.

En ce qui concerne les procédés FA basés sur une alimentation fil, on peut les répartir en deux catégories principales, qui correspondent à la manière dont le métal d'apport est mis en fusion : le procédé Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) se base sur le principe du soudage à l'arc ; et le procédé Wire Laser Additive Manufacturing (WLAM) qui consiste à utiliser un laser pour faire fondre le matériau d'apport.

Parmi les procédés utilisant du fil métallique, le procédé WAAM est actuellement le plus répandu avec l'avantage de pouvoir se baser sur le savoir-faire existant et l'utilisation des équipements de soudage à l'arc. Un certain nombre d'acteurs industriels du domaine aéronautique et naval sont déjà très impliqués avec la technologie WAAM pour des pièces industrielles de grande taille (raidisseurs de panneaux, pales d'hélices...). En revanche, une précision médiocre est obtenue, ce qui nécessite généralement une reprise des pièces en usinage puis une étape de parachèvement. Un autre inconvénient du procédé WAAM provient du fort rendement énergétique (90%) qui permet d'assurer un taux de dépôt élevé, mais qui se traduit généralement par des surchauffes des pièces en construction, avec l'introduction de fortes contraintes résiduelles et de distorsions géométriques indésirables. Cela nécessite alors un ralentissement des cadences ou l'utilisation de systèmes de refroidissement performants.

Le procédé WLAM qui fait l'objet de cette thèse, est un procédé plus récent que le procédé WAAM. Il se différencie par l'utilisation d'une source laser qui offre un meilleur contrôle de l'apport d'énergie localement sur la pièce. Le fil est le plus souvent amené sur la pièce de façon coaxiale aux faisceaux laser et non de façon déportée, ce qui facilite la gestion des trajectoires de la tête de dépose, mais permet aussi une meilleure répartition de l'énergie sur le fil et le bain de fusion (ADDere, Frauhoffer IWS, Meltio, Precitec, ...). L'utilisation d'une source laser offre ainsi de nombreux avantages : une densité d'énergie élevée pour un apport énergétique modéré, des vitesses de chauffage et de refroidissement élevées, de faibles déformations des pièces et des microstructures plus fines qu'en WAAM. Cela peut expliquer l'un des exemples spectaculaires d'application de ce procédé WLAM : la fabrication des tuyères du Vulcan 2 pour Ariane 5 par GKN Aerospace.

Associé à ce procédé innovant, le sujet de thèse portera sur un alliage d'aluminium avancé. Il faut en effet signaler l'intérêt croissant dans la littérature pour utiliser les techniques de FA pour les alliages d'aluminium, et en particulier ceux des séries 2000 et 7000 qui garantissent des propriétés mécaniques suffisantes pour répondre à la plupart des spécifications aéronautiques. De gros enjeux portent sur ces familles d'alliages d'autant qu'ils sont réputés non soudables. Ainsi, de très nombreux développements d'alliages d'aluminium adaptés pour la FA sont en cours au niveau international, afin notamment de les rendre plus tolérants vis-à-vis des gradients thermiques élevés rencontrés en FA tout en garantissant un niveau de propriétés mécaniques satisfaisant. Constellium a ainsi une position de leadership pour avoir conçu de nouveaux alliages qui intéressent actuellement certains industriels : deux nouvelles nuances adaptées au procédé L-PBF (alliages Aheadd[®]CP1 et Aheadd[®]HT1), ainsi qu'une troisième nuance, l'alliage 2xxx de la série 2000.

L'objectif de cette thèse en collaboration avec le LURPA de l'ENS Paris-Saclay, sera ainsi de maîtriser le procédé WLAM pour cette troisième nuance et d'identifier un gain de propriétés par rapport au procédé WAAM standard. Pour atteindre cet objectif, le travail s'articulera autour d'un volet principal de caractérisation expérimentale et d'un volet de pilotage et de modélisation du procédé de fabrication du procédé WLAM. Le travail se déclinera également suivant trois axes scientifiques séquentiels :

- Influence de la chimie d'alliage pour le procédé WLAM : A ce titre, l'alliage 2xxx sera comparé à un alliage de référence (nuance 2319) qui est déjà amplement utilisée en soudage laser chez les industriels et qui a déjà été étudié au LURPA lors de travaux préliminaires ;
- Effet du procédé WLAM et des stratégies de fabrication sur la géométrie des pièces fabriquées en alliage 2xxx, pour des structures élancées ou parois fines ;
- Effet du procédé (WLAM vs WAAM) pour l'alliage 2xxx avec des géométries plus épaisses par comparaison avec un certain nombre d'échantillons WAAM fournis par Constellium ;

Pour atteindre ces objectifs scientifiques, il sera nécessaire dans un premier temps de déterminer les paramètres du procédé WLAM les plus adaptées pour la nuance d'alliage 2xxx et d'y associer des stratégies de pilotage adaptatives pour assurer la fabricabilité de la pièce, dans une géométrie proche de la géométrie nominale. Pour cela il sera nécessaire de se pencher sur le comportement géométrique et thermique des cordons, puis des couches et enfin de la pièce, à partir de données issues de capteurs pendant l'élaboration et à partir de simulations géométriques et thermiques à l'échelle macroscopique. Les différentes expérimentations sur l'élaboration des recettes de fabrication et le développement des stratégies de pilotage seront menées sur la cellule laser-fil, robot industriel 6 axes équipé d'une tête WLAM coaxiale, disponible au sein du LURPA.

Une partie importante de la thèse sera ensuite menée à l'ONERA avec la caractérisation du matériau d'étude. Elle comprendra trois aspects :

- La caractérisation fine des évolutions métallurgiques dues à l'élaboration par le procédé WLAM mais également suite aux traitements thermiques mis en œuvre à l'issue de la fabrication. Cette caractérisation aura pour but d'optimiser la microstructure à l'échelle mésoscopique et microscopique avec le contrôle de la précipitation et sa stabilisation ainsi que de quantifier les éléments microstructuraux (taille de grains, taille de cellules, fraction volumique de précipités, taille des précipités).
- La caractérisation du comportement en traction pour évaluer le gain de performance obtenu à la fois grâce à la chimie de l'alliage 2xxx mais aussi grâce aux caractéristiques intéressantes du procédé WLAM.
- La tenue à la corrosion en fonction de la nuance d'alliage utilisée (2319 vs 2xxx), mais aussi en lien avec les caractéristiques spécifiques du procédé mis en œuvre comme la finesse de microstructure, la présence éventuelle d'hétérogénéités, l'impact de géométrie de pièces (parois fines ou plus épaisses), l'état de surface sachant que le procédé WLAM peut contribuer à une certaine rugosité de surface qui est connue pour impacter la résistance à la corrosion.

Cette étude comportementale permettra une meilleure compréhension des enjeux matériau et mettra en exergue les possibilités offertes par ce nouveau procédé de fabrication pour obtenir des pièces à géométrie complexe.

Par ailleurs, l'étude de l'influence de la composition chimique, dans le cas d'un alliage spécifiquement développé pour une utilisation en FA, offrira une compréhension approfondie des phénomènes métallurgiques mis en œuvre pendant le procédé WLAM et permettra ainsi de nourrir les études visant à développer des nuances d'alliages dédiés à la FA, mais également celles destinées à la réparation de pièces par ces procédés.

Collaborations envisagées : S'agissant d'une collaboration avec le laboratoire LURPA de l'ENS Paris-Saclay, la répartition de localisation de la thèse sera à 50% du temps à l'ENS Paris-Saclay et 50% du temps à l'ONERA, avec un financement assuré dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique « Hautes énergies en fabrication additive » (GIS HEAD).

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Département Matériaux et Structures

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Marc Thomas, Sébastien Mercier

Tél. 0146734475 Email : marc.thomas@onera.fr

Tél. 0146734465 Email :
sebastien.mercier@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Sylvain Lavernhe

Laboratoire : LURPA - ENS Paris-Saclay –
Université Paris-Saclay

Tél. : 01 81 87 51 82

Email : sylvain.lavernhe@ens-paris-saclay.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>