

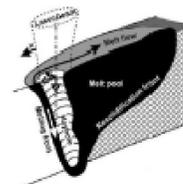
Caractérisation du mode Keyhole pour la fabrication additive en fusion laser sur lit de poudre, couplée avec une analyse de faisceau

Auteur : Maxence Guillon (EMSE) maxence.guillon@emse.fr
Directeurs de thèse : Christophe Desrayaud (EMSE) et Thomas El Guedj (INSA)
Encadrants : Xavier Boulnat (INSA), Pauline Lambert (EMSE), Joël Lachambre (INSA), Julien Sijobert (ENISE)



Définition

Qu'est-ce que la fusion laser sur lit de poudre ?
C'est un procédé de fabrication additive métallique c'est-à-dire une méthode de fabrication de pièce métallique en couche par couche. Un laser est utilisé pour fondre de la poudre de manière très locale.
Qu'est-ce que le mode keyhole ?
C'est un mode de fabrication qui consiste à concentrer l'énergie du laser afin de creuser dans la matière et de créer une cavité.
Seuil de densité d'énergie : pour être en mode keyhole, une densité d'énergie supérieure à 10^6 W/cm² est nécessaire



Objectifs

Le but de ces travaux est d'étudier les interactions laser-poudre pendant un procédé de fusion laser sur lit de poudre. Le régime keyhole avec formation d'une cavité est principalement étudié. L'objectif est de coupler la dimension de la cavité keyhole formée avec une analyse de faisceau pour obtenir la forme du faisceau et la répartition d'énergie.

Parties prenantes



Auteurs

Maxence Guillon
Thomas El Guedj
Xavier Boulnat
Joël Lachambre
Pauline Lambert
Julien Sijobert
Christophe Desrayaud

Partenaires

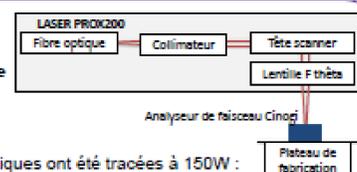


Matériels et Méthodes

Pour ces travaux, une poudre d'acier inoxydable 316L ainsi qu'une machine de fusion laser sur lit de poudre ProX200 (3D systems) sont utilisés avec un laser $\lambda=1070$ nm. Deux expériences sont effectuées :

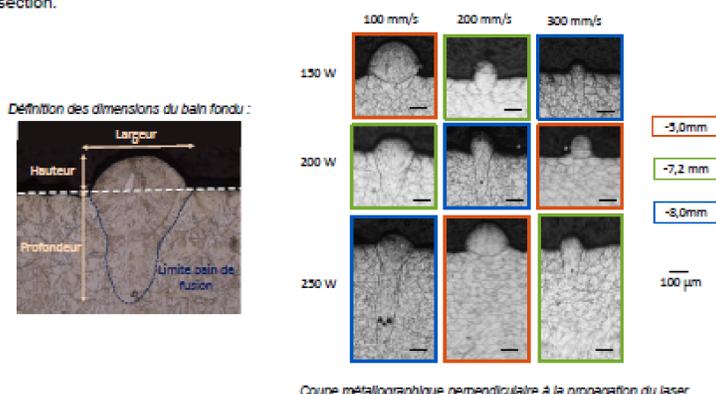
- Fabrication de mono cordons
 - Analyse du faisceau laser de la machine
- Pour la fabrication des mono cordons, un plan d'expérience avec 3 paramètres à 3 niveaux a été réalisé :
- Puissance du laser (150W, 200W, 250W)
 - Vitesse du laser (100mm/s, 200mm/s, 300mm/s)
 - Focale de la lentille (-5mm, -7.2mm, -8mm), déterminée par le positionnement du plateau

- Pour l'analyse du de faisceau, 3 caustiques ont été tracées à 150W :
- A froid (sans chauffe de la lentille)
 - A chaud en début de couche (cycle de 5min de chauffe de la lentille suivi de 15s de refroidissement)
 - A chaud en fin de couche (cycle de 5 min de chauffe, 15s de refroidissement suivi d'un tir statique de 45s)

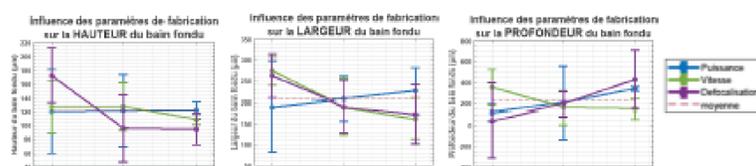


Résultats – Mono Cordons

Caractérisation métallographique des échantillons fabriqués : visualisation du bain fondu et donc de la cavité keyhole par attaque électrochimique après coupe métallographique en cross section.



La première étape consiste à quantifier l'influence de chaque paramètre sur la cavité keyhole formée. Cela passe donc par des mesures des dimensions du bain fondu (profondeur, hauteur, largeur). L'influence de chaque paramètre sur les dimensions du bain fondu se mesure en faisant une moyenne sur les échantillons ayant le même niveau de puissance, vitesse et focale. Ces moyennes sont représentées sur les graphiques ci-dessous :



On peut donc quantifier l'influence de chaque paramètre sur la dimension du bain en faisant la différence entre la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible pour un même niveau. Ces valeurs sont représentées dans le tableau ci-dessous :

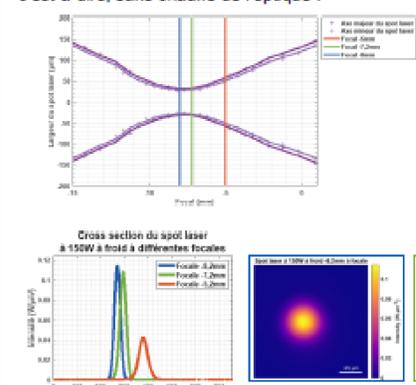
	Hauteur	Largeur	Profondeur
Effet Puissance	1,8 (1,8%)	36,5 (15,2%)	224,6 (27,5%)
Effet Vitesse	19,2 (19,4%)	113,1 (47,1%)	205,0 (25,1%)
Effet focale	78,0 (78,8%)	90,4 (37,7%)	387,7 (47,4%)

On note ici que la focale utilisée a un impact important sur la forme du bain et donc sur l'apparition de la cavité keyhole. La modification de la focale aura deux impacts majeurs sur le lit de poudre :

- Modification de la répartition d'énergie
- Modification de la taille du spot

Résultats – Analyses laser

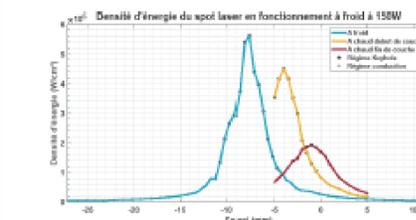
Visualisation de la caustique (représentation en 2D de la forme du laser) du faisceau laser à 150W à froid, c'est-à-dire, sans chauffe de l'optique :



Le tracé de la caustique nous permet par la suite d'en extraire les informations aux focales (c'est-à-dire aux différentes positions du plateau), qui nous intéressent soit celles utilisées pour la fabrication des mono cordons. On peut alors mesurer la taille* et donc la surface du spot, l'énergie reçu par le capteur et en déduire la densité d'énergie. On peut également tracer les cross section des spots et en déduire la qualité gaussienne du spot.

focale (mm)	-8,2	-7,2	-5,2
Diamètre spot laser* (µm)	54,3	55,2	109,8
Puissance* (W (%))	126,6 (87,5)	126,5 (89,3)	127,4 (86,9)
Densité (W/cm ²)	5,53*10 ⁶	4,85*10 ⁶	1,36*10 ⁶

On voit que pour une focale -5mm, on respecte la valeur seuil pour travailler en mode keyhole mais on n'observe pas de cavité sur les clichés de métallographie.



On peut calculer la densité d'énergie en fonction de la focale pour les trois moments d'utilisation de la lentille. Le maximum de densité de puissance est atteinte pour la taille de spot la plus faible, donc au niveau du waist du faisceau laser.

La lentille F theta absorbe une quantité de l'énergie du laser, ce qui entraîne une déformation de la lentille et un changement de l'indice de réfraction. Cela a pour conséquence de remonter le point focale et d'agrandir la taille du spot au niveau du waist ce qui engendre un effondrement de la densité d'énergie au cours de la fabrication.

*Données calculées à partir des normes ISO 11 145 et ISO 11 146-2

Conclusions / Perspectives

Au cours d'une construction par fusion laser sur lit de poudre, le spot laser évolue rapidement avec la chauffe de l'optique : le point focale de la lentille a tendance à remonter dans les positifs à cause de la déformation de la lentille. En restant à une focale fixe pendant le lasage d'une couche, la surface et la répartition de l'énergie du spot au contact de la poudre sont différentes en début de couche et en fin de couche.

Cependant, les essais menés ont été réalisés avec des tirs statiques qui ne sont pas représentatifs de la réalité à l'échelle de la réalisation d'une couche. Une caractérisation plus fine de l'évolution du laser est nécessaire. Une mesure en simulant les « laser on » et les « laser off » d'une couche pourra être faite pour visualiser les évolutions du spot entre le début et la fin de la couche. De plus, la mise en œuvre complète avec des cycles de nettoyage lentille, qui génèrent un refroidissement du chemin optique, pourra être mis en place pour suivre au mieux les dynamiques du spot au cours de la réalisation d'une couche.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au titre du programme Investissement d'Avenir (PIA) portant la référence EUR MANUTECH SLEIGHT - ANR-17-EURE-0026.